



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

# VYHODNOCENÍ VLIVU TVARU DÝZY NA TLAK V DRÁZE PRIMÁRNÍHO SVAZKU ELEKTRONŮ V UZAVŘENÉ VARIANTĚ KOMORY DIFERENCIÁLNÍHO ČERPÁNÍ POMOCÍ CAE

USING COMPUTER AIDED ENGINEERING FOR ANALYSIS OF THE ESEM DIFFERENTIAL  
CHAMBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VOJTĚCH ČECH

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Student:** Bc. Vojtěch Čech

**ID:** 83088

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Vyhodnocení vlivu tvaru dýzy na tlak v dráze primárního svazku  
elektronů v uzavřené variantě komory diferenciálního čerpání pomocí CAE**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou elektronové mikroskopie se zaměřením na oblast vakua a se systémy SolidWorks a Cosmos FloWorks. Pomocí systému CAD a CAE (Computer Aided Engineering – počítačová podpora inženýrských prací) vyhodnoťte vliv tvaru dýzy na tlak v dráze primárního svazku elektronů v uzavřené variantě komory diferenciálního čerpání u enviromentálního rastrovacího elektronového mikroskopu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Předložená diplomová práce se zabývá analýzou a vyhodnocením vlivu tvaru dýzy na tlak v dráze primárního svazku elektronů v uzavřené variantě komory diferenciálního čerpání. Jako nástroje pro analýzu, vyhodnocení a prozkoumání dané problematiky budou použity systémy CAD a CAE (Computer Aided Engineering - počítačová podpora inženýrských prací).

## **Abstract**

The master's thesis will focus on using Computer Aided Engineering for analysis of the ESEM differential chamber. The instruments used for the analysis, evaluation and scrutiny of the given issue will be the CAD and CAE systems (Computer Aided Design and Computer Aided Engineering).

## **Klíčové slova**

CAD, CAE (počítačová podpora inženýrských prací), elektronový mikroskop, dýza, diferenciální čerpání, environmentální mikroskop, 3D

## **Keywords**

CAD - Computer Aided Design, CAE - Computer Aided Engineering, electron microscope, jettube, differential pumping, environmental scanning electron microscope. 3D

## **Bibliografická citace díla**

ČECH, V. *Vyhodnocení vlivu tvaru dýzy na tlak v dráze primárního svazku elektronů v uzavřené variantě komory diferenciálního čerpání pomocí CAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 98 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vyhodnocení vlivu tvaru dýzy na tlak v dráze primárního svazku elektronů v uzavřené variantě komory diferenciálního čerpání pomocí CAE jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## Poděkování

*Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.*

*Na tomto místě bych rád poděkoval rodičům za podporu při mém mnohaletém studiu. Mgr. Kateřině Malované za psychickou podporu a Bc. Karlu Cihláři za dlouhodobou studijní podporu.*

# Obsah

Seznam obrázků .....	7
Úvod.....	8
1 Elektronová mikroskopie .....	10
1.1 Fyzikální podstata mikroskopie .....	10
1.2 Rozdělení mikroskopu.....	12
1.3 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM).....	13
1.4 Řádkovací elektronová mikroskopie (SEM) .....	14
1.5 Environmentální SEM.....	15
1.6 Tlak plynu a vakuový systém.....	16
1.7 Diferenciálně čerpaná komora .....	19
2 Model proudění tekutiny .....	22
2.1 Základní pojmy z proudění tekutin .....	22
2.2 Typy proudění .....	25
2.2.1 Turbulentní proudění.....	25
2.2.2 Laminární proudění .....	26
3 Metoda konečných objemů .....	27
3.1 Diskretizace výchozích rovnic - numerické modelování .....	29
3.2 Transformace souřadnic .....	32
3.3 Základní rovnice popisující proudění v řešené komoře .....	34
3.4 Okrajové a počáteční podmínky řešení .....	38
4 Zadání podmínek v SolidWorks FloSimulation.....	41
4.1 Nastavení sítě .....	41
4.2 Nastavení okrajových podmínek .....	45
4.3 Cíle vlastního výpočtů.....	46
5 Zpracování výsledků analýzy.....	47
5.1 Vyhodnocení prostoru dráhy primárního svazku elektronů .....	47
5.2 Grafický výstup.....	48
6 Vyhodnocení nejvýhodnější varianty clony diferenciálně čerpané komory .....	52
6.1 Real 3D zobrazení nejvýhodnějších tvarů.....	56
7 Závěr .....	58
8 Bibliografie .....	60
9 Seznam použitých veličin a převod vybraných hodnot.....	62

10	Příloha 1 .....	63
11	Příloha 2 .....	84



# Seznam obrázků

Obr. 1.1: Typická velikost objektů, které lze pozorovat elektronovým mikroskopem. Pro srovnání je uveden i rozsah světelného mikroskopu [1].	10
Obr. 1.2: Typické signály vznikající při dopadu elektronů na povrch pevné látky [1].	12
Obr. 1.3: Schematické znázornění principu transmisního (vlevo) a řádkovacího (vpravo) elektronového mikroskopu [1].	13
Obr. 1.4: Mikrostruktura slitiny Al-3%Mg-0,2%Sc [1]	14
Obr. 1.5: Zobrazení pylu pomocí SEM [20].	15
Obr. 1.6: Schéma dvoustupňového systému diferenčního čerpání pro ESEM	19
Obr. 1.7: Diferenciální komora mikroskopu [3]	20
Obr. 2.1: Schematické znázornění turbulentního proudění	26
Obr. 2.2: Schematické znázornění laminárního proudění	26
Obr. 3.1: Diskretizace funkce	27
Obr. 3.2: Ovlivňující se sousední buňky u metody konečných objemů	28
Obr. 3.3: Cyklus výpočtu	28
Obr. 3.4: Objemový element	30
Obr. 3.5: Vložení výpočtového elementu v síti a směr působení na okolní buňky	31
Obr. 3.6: Neortogonální síť - "boundary-fitted coordinate" (BFC) systém	32
Obr. 4.1: Ukázka nastavení sítě High-cone-fanwise.	44
Obr. 4.2: Detail sítě u High	44
Obr. 4.3: Hodnoty nastavení okrajových podmínek v elektronovém mikroskopu	46
Obr. 5.1: Dráha průchodu primárního elektronového svazku.	48
Obr. 5.2: Ukázka změn tlaku při změně tvaru clonky pro hodnoty tlaku 1000 Pa; A) Hight-cone-fanwise; B) Hight-cone C) Hight; D) Short.	49
Obr. 5.3: Ukázka změn tlaku při změně tvaru clonky pro hodnoty tlaku 200 Pa; A) Hight-cone-fanwise; B) Hight-cone C) Hight; D) Short.	50
Obr. 5.4: Průběh vektorů proudění plynu a statického tlaku ve variantě 200 Pa Low-cone	50
Obr. 5.5: Grafická ukázka zobrazení vektorů rychlosti proudění – Short	51
Obr. 6.1: Náhled na vybrané tvary popsané v tabulce 4	54
Obr. 6.2: Graf průměrného tlaku v pozorované oblasti pro varianty 200 Pa a 1000 Pa	54
Obr. 6.3: Grafy průběhu tlaku a rychlosti průtoku pro varianty 1000 Pa a 200 Pa – A,B varianta 1000 Pa; C,D varianta 200 Pa.	55
Obr. 6.4: Stereoskopické zobrazení varianty Short	63
Obr. 6.5: Stereoskopické zobrazení varianty Low-cone	63
Obr. 10.1: Dráha průchodu primárního elektronového svazku.	63
Obr. 11.1: Statický tlak 0 – 100 Pa.	85
Obr. 11.2: Machovo číslo 0 – 1 Mach	86
Obr. 11.3: Vektory rychlosti proudění.	87
Obr. 11.4: Statický tlak 0 – 300 Pa.	88
Obr. 11.5: Machovo číslo 0 – 3 Machy	89
Obr. 11.6: Vektory rychlosti proudění.	90
Obr. 11.7: Statický tlak 0 – 300 Pa.	91
Obr. 11.8: Machovo číslo 0 – 1 Mach	92
Obr. 11.9: Vektory rychlosti proudění.	93
Obr. 11.10: Statický tlak 0 – 300 Pa.	94
Obr. 11.11: Machovo číslo 0 – 3 Machy	95
Obr. 11.12: Vektory rychlosti proudění.	96

# Úvod

Předložená diplomová práce se zabývá analýzou a vyhodnocením vlivu tvaru dýzy na tlak v dráze primárního svazku elektronů v uzavřené variantě komory diferenciálního čerpání.

Práce využívá stále se rozvíjející CAE (Computer Aided Engineering – počítačová podpora inženýrských prací) systém pro analýzu diferenciálně čerpané komory v oblasti elektronové mikroskopie. Hlavní výhodou těchto systémů je rychlost a radikální snížení ceny výroby analyzovaných prvků. To je způsobeno modelováním zvolených parametrů a jejich následné vyhodnocení, čímž se sníží potřeba výroby mnoha prototypů.

První dílčí část práce, teoretický úvod, se věnuje popisu elektronové mikroskopie a osvětluje výhody využití urychlených elektronů. Celá problematika je zaměřena na čerpání vzduchu ze systému mezi komorou vzorku u environmentálního mikroskopu, v němž se může vyskytovat vysoký tlak vzduchu (až 2000 Pa), a tubusem mikroskopu s elektronovou optikou ve vysokém vakuu v řádu 0,01 Pa. Výklad celé problematiky je zúžen na oblast, kterou se celá práce zabývá.

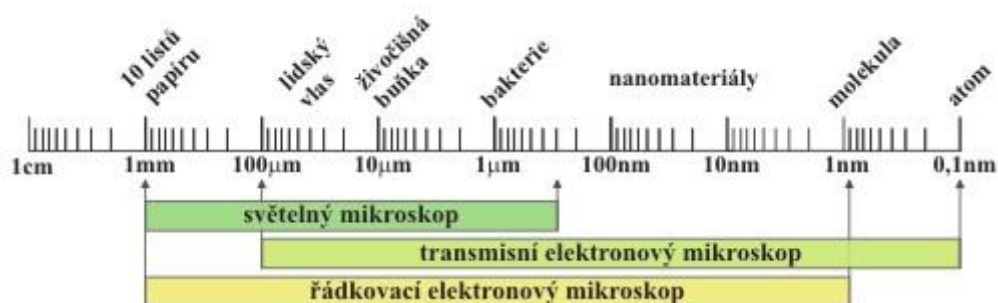
U diferenciálně čerpané komory je popsán princip, který mimo jiné vyžaduje, aby v oblasti průchodu primárního elektronového svazku byl velmi nízký tlak z důvodu minimalizování rozptylu tohoto svazku. Elektronový svazek nemůže procházet prostředím s běžným tlakem plynu, neboť srážky s molekulami plynu by jej zcela rozptýlily. Proto je popis uvedené části mikroskopu zaměřen především na požadavky čerpání plynu z jeho prostoru. Vlastnosti odčerpávaného plynu jsou následně vyhodnoceny pomocí systému Cosmos FloWorks. Tento systém pro analýzu využívá metody konečných objemů. Vyhodnocením výsledků výstupů Cosmos FloWorks se zabývá druhá polovina diplomové práce, praktická část.

Z důvodu přehlednosti jsou v práci uvedeny jen výsledky srovnání analyzovaných tvarů pro varianty 200 a 1000 Pa. Podrobné výsledky tvarů, vyhodnocených jako nejvýhodnější, včetně grafických a tabulkových hodnot, jsou k dispozici v přílohách. Všechny ostatní studované tvary je možné si prohlédnout v elektronické podobě na přiloženém DVD.

## **Teoretická část práce**

# 1 Elektronová mikroskopie

Lidstvo vždy chtělo pozorovat stále menší a menší detaily svého okolí. A k tomuto pozorování je lidské oko velmi nedokonalé. Proto se člověk snažil přiblížit ke svému okolí za použití techniky. Tímto vznikla mikroskopie, která je odvozena od řeckého slova mikro (malý) a skopie (dívat se, pozorovat). Biologové chtějí zkoumat struktury buněk, bakterií a virů. Vědci, kteří se zabývají vlastnostmi materiálů, chtějí pozorovat nehomogenity a poruchy v kovech, krystalech a keramických materiálech. V rozličných odvětvích geologie umožnily detailní studie hornin, minerálů a fosilií pochopit původ naší planety a jejich cenných minerálních zdrojů



Obr. 1.1: Typická velikost objektů, které lze pozorovat elektronovým mikroskopem. Pro srovnání je uveden i rozsah světelného mikroskopu [1].

## 1.1 Fyzikální podstata mikroskopie

Jakýkoliv mikroskop může rozlišit maximálně 2 body ležící od sebe ve vzdálenosti  $\frac{1}{2} \lambda$  (vlnové délky) zdroje osvětlení.

A tedy hlavní omezení optického mikroskopu není jen v důsledku nedokonalostí, v kvalitě a množství čoček, ale také vlnová délka světla použitého pro osvětlení předmětu. Viditelné světlo má  $\lambda$  přibližně 550 nm = světelný mikroskop má rozlišovací schopnost přibližně 250 nm. Maximální užitečné zvětšení je tedy 1000x. Za pomoci kratší vlnové délky (modré světlo a ultrafialové spektrum) a ponořením vzorku a přední čočky do kapaliny s vysokým indexem lomu vedlo k „malému“ zlepšení rozlišení, ale jen těsně pod 100 nm.

Rozlišovací schopnost oka/rozlišovací schopnost mikroskopu $=0,25/2,5 \cdot 10^{-4} = 1000x$

Vlnová délka příslušející urychlenému elektronu (60kV) je přibližně 0,005nm (=stotisíckrát kratší než viditelné světlo).

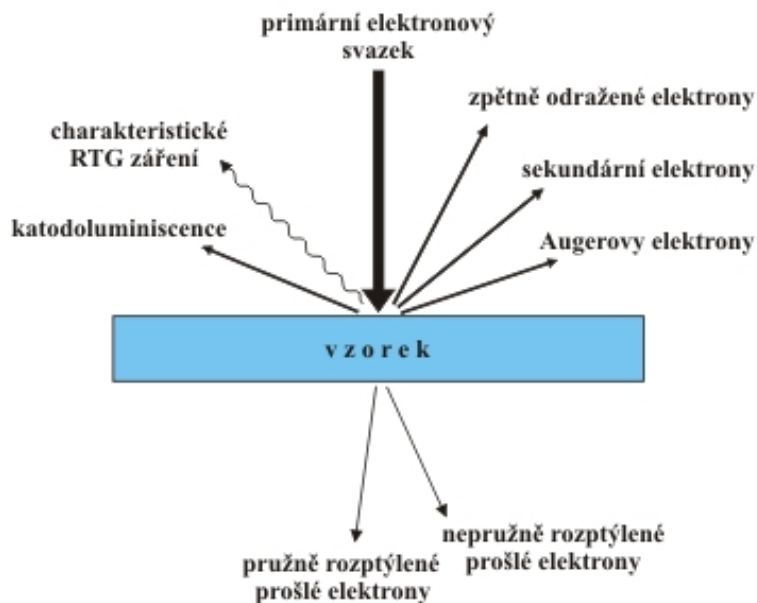
$$0,25/2,5 \cdot 10^{-7} = 1\,000\,000x$$

První experimenty s urychlenými elektrony se datují k roku 1920, kdy bylo zjištěno, že ve vakuu se urychlené elektrony chovají jako světlo. K tomu poznatku se přidal i fakt, že je elektrické a magnetické pole ovlivňují stejně, jako čočky a zrcadla viditelné světlo.

V roce 1931 těchto poznatků využil k sestavení prvního prozařovacího (transmisního) elektronového mikroskopu (TEM) Dr. Ernst Ruska z Berlínské univerzity. Za svůj objev získal v roce 1986 Nobelovu cenu za fyziku. V prvním elektronovém mikroskopu byly použity dvě magnetické čočky. O tři roky později byla přidána třetí čočka a bylo dosaženo rozlišení 100 nm, které bylo dvakrát lepší než rozlišení optického mikroskopu. V současnosti se používá v zobrazovací soustavě pět magnetických čoček a dosahuje se rozlišovací schopnosti 0,1 nm při zvětšení jeden milion [1].

Praktická rozlišovací schopnost elektronového mikroskopu je 0,5-0,7 nm, špičkově 0,25- 0,3nm, tedy méně než teoretická hodnota, z důvodu vad elektrooptického systému [2].

Při dopadu svazku elektronů o dostatečné energii na povrch pevné látky dochází k celé řadě procesů a důsledkem interakce elektronů s pevnou látkou je vznik celé řady signálů, viz Obr. 1.2, které se dále využívají pro studium vlastností pevných látek. Přitom aktivními zdroji těchto signálů jsou specifické oblasti vzorku v okolí dopadu elektronového svazku. Velikost těchto oblastí silně závisí na energii dopadajících elektronů a na atomovém čísle vzorku.

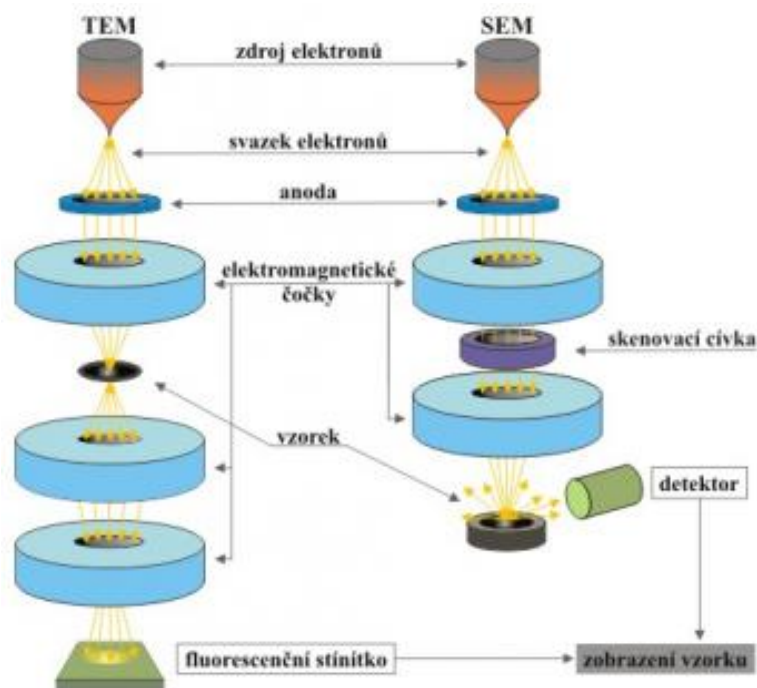


Obr. 1.2: Typické signály vznikající při dopadu elektronů na povrch pevné látky [1]

## 1.2 Rozdělení mikroskopu

Elektronové mikroskopy se zjednodušeně dají rozdělit na dva typy. Prvním vyrobeným typem byl transmisní elektronový mikroskop (TEM – transmission electron microscope) a pozdějším typem je řádkovací elektronový mikroskop (SEM – scanning electron microscope).

Transmisní mikroskopy jsou využity pro pozorování a analýze vnitřní struktury vzorků. U těch nejvýkonnějších typů až k pozorování jednotlivých atomů. Řádkovací mikroskopy jsou využity pro pozorování libovolně velkého povrchu vzorku a jeho analýzu (velikost je dána velikostí komory pro vzorky). Schéma optické soustavy obou typů je uvedeno na Obr. 1.3.

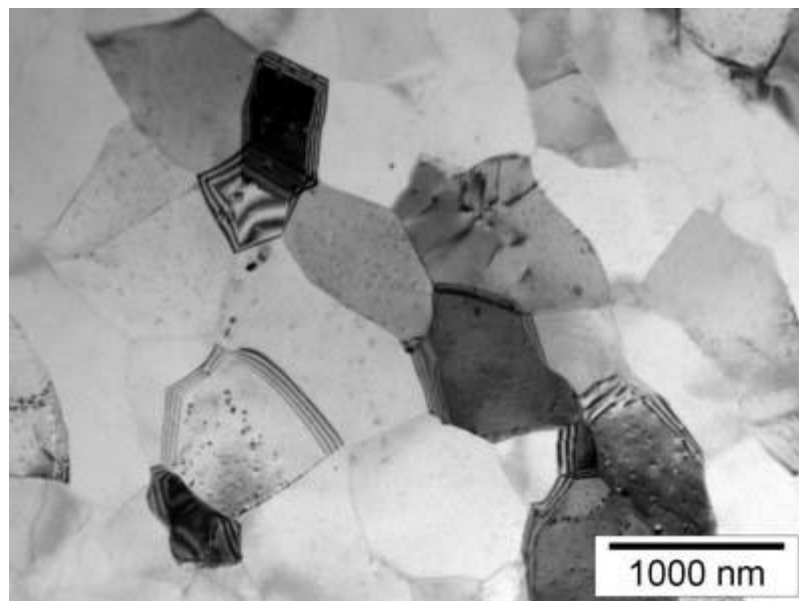


**Obr. 1.3:** Schematické znázornění principu transmisního (vlevo) a řádkovacího (vpravo) elektronového mikroskopu [1]

### 1.3 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)

Tento typ mikroskopu lze přirovnat k diaprojektoru [21]. Namísto světelného zdroje je použit zdroj elektronů, optické čočky pro zaostření jsou nahrazeny elektromagnetickými a projekční plocha fluorescenčním stínítkem, které při dopadu elektronu vyzáří světlo. Celý tento systém i se vzorkem a zdrojem elektronů, který je zajištěn žhaveným wolframovým vláknem, je umístěn ve vakuu. Navíc vzorek musí být velmi tenký, aby jím mohli projít elektrony.

Pomocí TEM lze studovat vznik, vlastnosti a vzájemné působení jednotlivých poruch krystalové struktury vzorků [1]. Obr. 1.4 znázorňuje typický pohled na obraz pořízený mikroskopem TEM, jedná se zde o mikrostrukturu hliníkové slitiny Al–3%Mg–0,2%Sc v nejběžnějším módu.



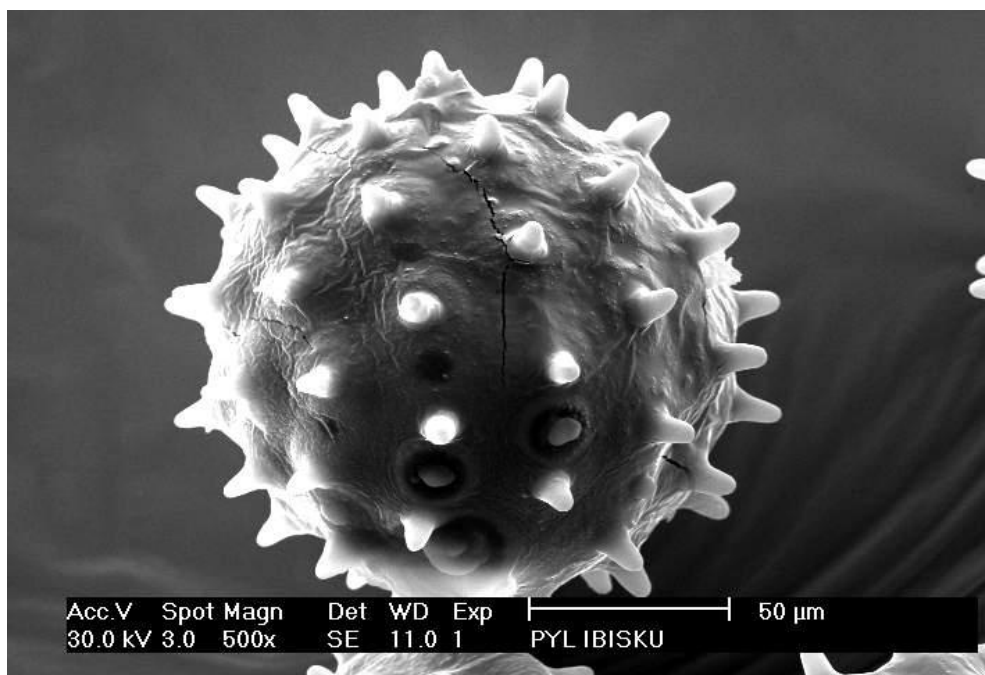
**Obr. 1.4:** Mikrostruktura slitiny Al-3%Mg-0,2%Sc [1]

## **1.4 Řádkovací elektronová mikroskopie (SEM)**

První použitelný řádkovací elektronový mikroskop (SEM) s rozlišovací schopností 50 nm a zvětšením 8 000x byl zkonstruován V. K. Zworykinem a kolektivem v roce 1942 [1]. Použil se rastrovací princip ve spojení s detekcí vyražených elektronů pomocí fotonásobiče. Ovšem první dostupný SEM použitelný pro komerční účely pak spatřil světlo světa až v roce 1965.

Mikroskopy SEM využívají ostře fokusovaný svazek elektronů, který dopadá na pozorovaný preparát a interakcí s hmotou vyráží ze vzorku elektrony. Takto vyvolaný fyzikální signál, teprve nese informaci o místě dopadu svazku elektronů na vzorek. Tyto iterované elektrony jsou pomocí vhodného potenciálu přitahovány na detektory, které vytváří signál upravený pro zpracování v zobrazovacím systému [3]. Zobrazovacím systémem může být obrazovka, na které se vytváří příslušný obraz vzniklý rastrováním elektronového paprsku po snímané ploše. Výsledným obrazem je snímek, který zachycuje povrchovou strukturu preparátu. Na Obr. 1.5 je fotografie pylu vytvořena za pomoci SEM mikroskopu. Schematický princip mikroskopu je uveden na Obr. 1.3.





Obr. 1.5: Zobrazení pylu pomocí SEM [20]

## 1.5 Environmentální SEM

Vzorek u předešlých běžných mikroskopů musí být:

- čistý
- suchý
- elektricky vodivý
- musí snést vakuum

Tyto nutné podmínky zamezovali pozorování některých vzorů. Jedná se hlavně o biologické preparáty, tuky, bavlněné či vlnité tkaniny. Příprava takového vzorku pro pozorování byla velmi složitá, zdoluhavá a finančně náročná. Vzorok se museli předsušovat, podchlazovat, chemicky ošetřovat a odvodňovat. Pro pozorování takto problematických vzorků byl vyvinut environmentální rastrovací elektronový mikroskop (ESEM). Principiálně se ESEM neliší od klasického SEM mikroskopu. Jedinou změnou je oddělení vakua v tubusu a komory vzorku. Mezi tyto dvě části mikroskopu byla vložena ještě jedna komora s diferenciálním čerpáním – diferenciálně čerpaná komora. Pomocí této komory je možné mít v komoře vzorku vyšší tlak plynu.

Environmentální mikroskop tedy umožňuje zkoumat vzorky neovlivněné vakuem a sušením. Pracují do tlaku až 3000 Pa oproti klasickým rastrovacím mikroskopům v tlaku pod 0,001 Pa [3].

Velkým problémem na začátku vývoje ESEM byl nedostatek vhodných detektorů, které by pracovaly ve zvýšeném tlaku plynu [4]. Zvýšený tlak plynu má za následek zvýšený počet srážek primárního svazku elektronů s molekulami vzduch či jiného plynu respektive vodních par. Tyto srážky mají za následek rozptyl svazku a tedy jeho rozostření. Rozptyl primárních elektronů roste se zvyšujícím se tlakem plynu, pracovní vzdáleností a s klesajícím urychlovacím napětím svazku. Tyto projevy mají za následek zvětšení průměru stopy primárního elektronového svazku, což se projeví zhoršením rozlišovací schopnosti mikroskopu. [3]

Firma ElectroScan v Bostonu vyvinula detektor sekundárních elektronů, který funguje v plynném prostředí [5]. Detektor využívá kaskádního zesilování nejen pro zesílení signálu sekundárních elektronů, ale také pro tvorbu kladně nabitých iontů, které jsou přitahovány záporným nábojem na izolovaném povrchu vzorku a tento náboj účinně potlačují (neutralizují).

## 1.6 Tlak plynu a vakuový systém

Základní jednotkou tlaku je Pascal [Pa]. Jeden Pascal je tlak, který vyvolá síla 1 newtonu rovnoměrně rozložená na rovinné ploše  $S$  s obsahem jednoho čtverečního metru, kolmé ke směru síly  $F$ .

$$p = \frac{F}{S} \quad (1.1)$$

### Oblasti tlaku ve vakuové technice:

- **Hrubé vakuum ( $100 - 10^{-1}$  Pa /1 Torr ÷  $10^{-3}$  Torr):**

Mechanické manipulátory, vakuové balení a formování, manipulace s plyny a jejich filtrace, odplyňování olejů, zahušťování/kondenzace vodných roztoků, sušení, destilace, impregnace v elektrotechnice, odplyňování v metalurgii [6].

- **Střední vakuum ( $10^{-1} \div 10^{-3} \text{ Pa} / 10^{-3} \div 10^{-5} \text{ Torr}$ ):**

Metalurgické procesy, (tavení, slévání, sintrování), tepelné procesy, žíhání, vakuová destilace, sušení ve farmakologii a potravinářství [6].

- **Vysoké vakuum ( $10^{-3} \div 10^{-6} \text{ Pa} / 10^{-5} \div 10^{-8} \text{ Torr}$ ):**

Kryogenní zařízení, elektrická izolace, výroba elektronek a obrazovek, hmotnostní spektrometry, tenké vrstvy a povlaky ve strojírenství, chemii, elektronice a architektuře [6].

- **Ultravakuum (pod  $10^{-6} \text{ Pa} / 10^{-8} \text{ Torr}$ ):**

Elektronové mikroskopy, analytické hmotnostní spektrometry, urychlovače částic, simulátory kosmického prostoru, zařízení pro studium čistých povrchů [6].

#### **Další jednotky tlaku:**

**Torr** (1 Torr = 1 mmHg) - jedna z nejstarších jednotek pro vyjádření tlaku, stále se však používá v USA a v Japonsku. Od ní je odvozená jednotka 1 micron Hg = 1 milliTorr [6].

$$1 \text{ Torr} = 133,3 \text{ Pa}, 1 \text{ Pa} = 7,5 \times 10^{-3} \text{ Torr}$$

**mbar** – jednotka odvozená od jednotky bar se ještě často používá v Evropě, především v německy mluvících zemích [6].

$$1 \text{ millibar} = 100 \text{ Pa} = 0,75 \text{ Torr}$$

**atm** – atmosféra, starší jednotka (1 atm = 760 Torr), ve vakuové technice se nepoužívá. Standardní atmosféra byla nahrazena novou jednotkou Pascal v roce 1971: 1 atm =  $10^5 \text{ Pa}$  [ $\text{N/m}^2$ ] [6].

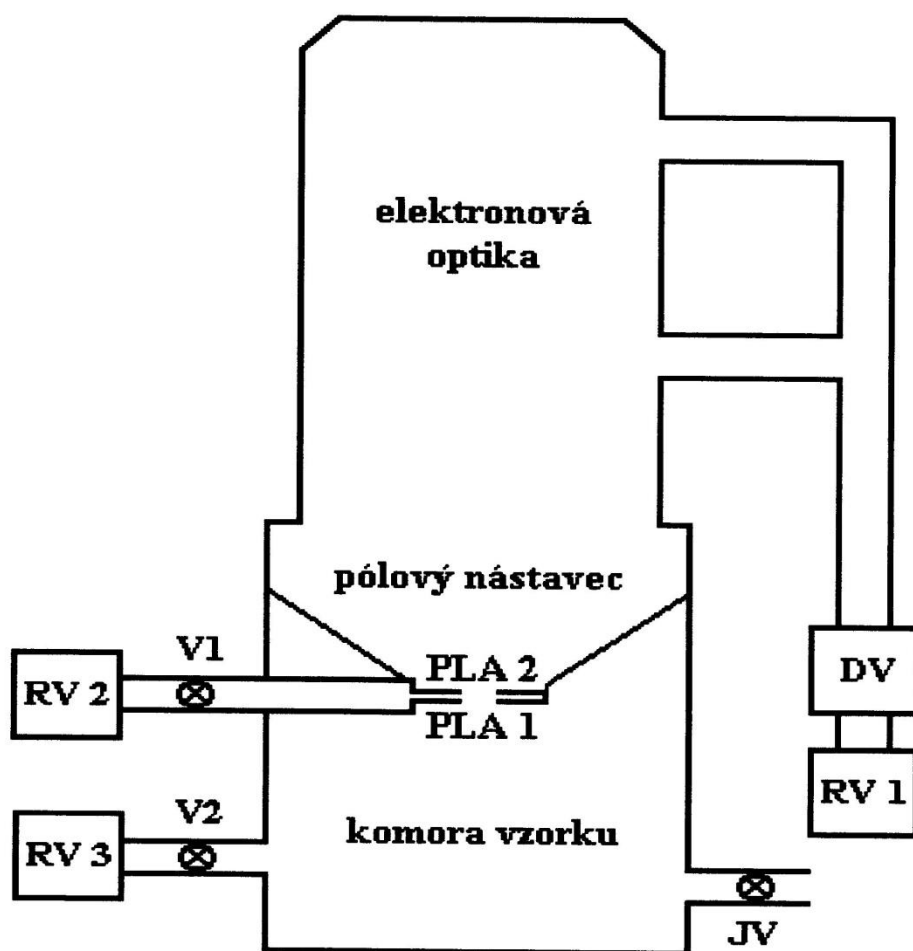
$$1 \text{ atm} = 1,0133 \text{ bar} = 1,0133 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ Torr}$$

**PSI** – pound per square inch (libra na čtvereční palec) se používá v anglosaských zemích pro vyjádření tlaku, ne však ve vakuové technice [6].

Zjednodušené schéma vakuového systému environmentálního mikroskopu, pracujícího s přímo žhavenou wolframovou katodou a komorou vzorku s tlaky řádově  $10^{-3}$  Pa je na Obr. 1.6. Částí s nejnižším tlakem  $10^{-3}$  Pa je tubus (elektronová optika na Obr. 1.6), v němž je využíváno vysokého napětí ke generaci a urychlování elektronového svazku. Velmi vysoké vakuum v celé části tubusu však také přispívá k bezproblémovému šíření tohoto svazku, jehož elektrony by mohly být rozptýleny molekulami vzduchu. Tubus mikroskopu je předčerpáván rotační vývěvou RV1, zabezpečující funkční prostředí pro druhou vývěvu difúzní DV. Pomocí této vývěvy je dosaženo vhodného tlaku pro správnou funkci přímo žhavené wolframové katody. Již zmíněný tlak  $10^{-3}$  Pa, by však nebylo možné v tubusu mikroskopu ESEM udržet bez použití dvou tlak omezujících clon. Tyto clony s malými otvory umožňují potlačit proudění plynu mezi jednotlivými prostory mikroskopu s rozdílnými tlaky a společně s účinným čerpáním těchto jednotlivých oblastí, přispívají k dosažení požadovaného spádu tlaků.

Vakuová clona PLA2 (viz Obr. 1.6) plní současně funkci aperturní clony projekční čočky mikroskopu. Prostor mezi ní a clonkou PLA1 (viz Obr. 1.6) bývá nazýván komorou diferenciálního čerpání, která je čerpána rotační vývěvou RV2 (viz Obr. 1.6). Z důvodu velmi přísných požadavků na těsnost, se zdá být účelné minimalizovat průměry otvorů clon. Je však nutné uvážit požadavky elektronové optiky v případě clony PLA2 a snižování zorného pole mikroskopu v případě clony PLA1.

Částí environmentálního mikroskopu s nejvyšším tlakem, je komora vzorku (viz Obr. 1.6). Pracovní tlaku plynu se v tomto prostoru dosáhne ustavením rovnováhy mezi připouštěním plynu a čerpáním komory rotační vývěvou RV3. Připouštění plynů do komory vzorku je zajištěno přes jehlový ventil JV.



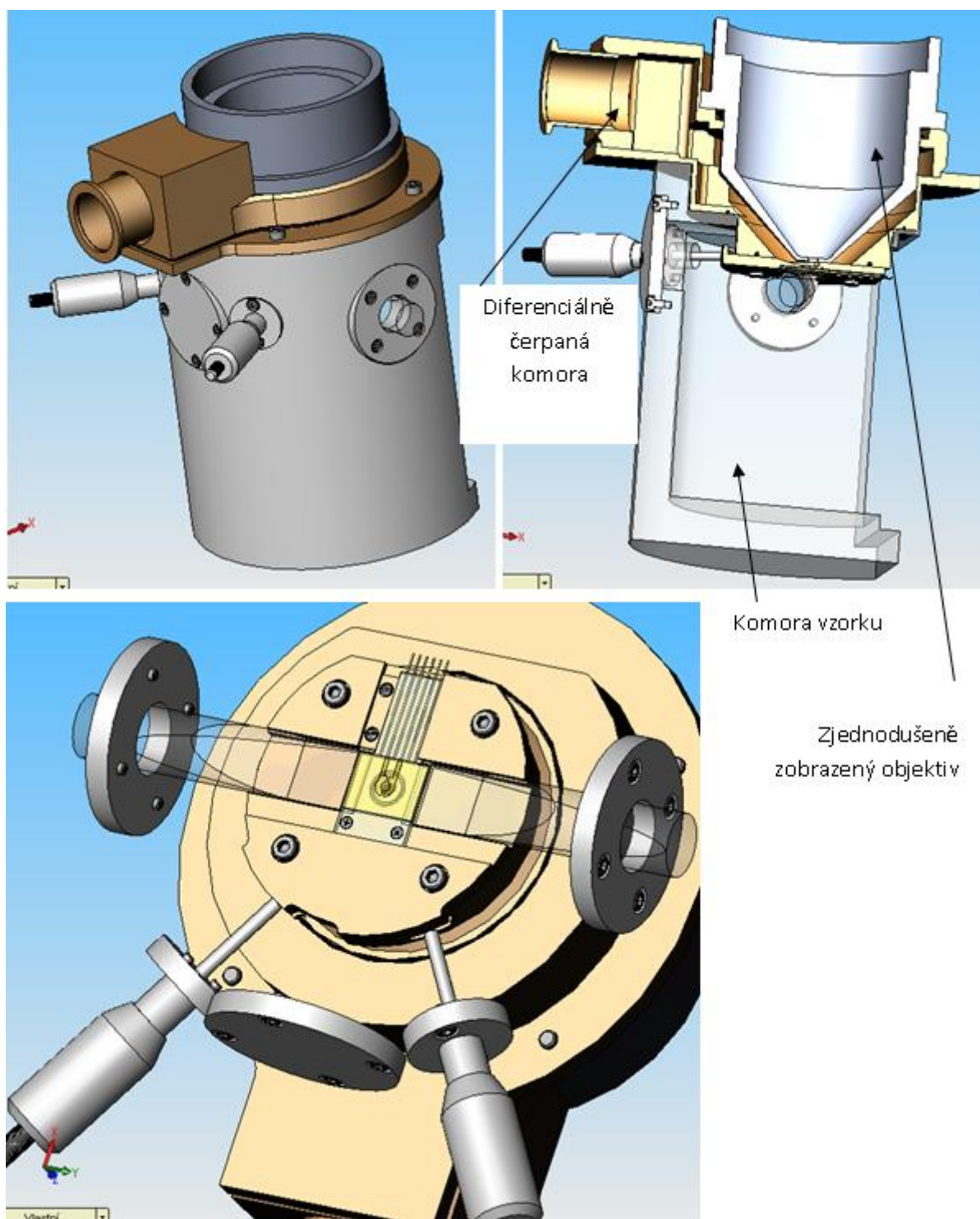
Obr. 1.6: Schéma dvoustupňového systému diferenčního čerpání pro ESEM

## 1.7 Diferenciálně čerpaná komora

Jak bylo uvedeno, diferenciálně čerpaná komora (Obr. 1.7) je samostatně čerpanou komorou (cca 30 Pa), aby jako mezičlánek oddělila prostředí velmi nízkého tlaku v tubusu (0.01 Pa) a prostředí vyššího tlaku (1500-2000 Pa) v komoře vzorku [3].

Náročnost celé konstrukce závisí na kvalitě čerpání plynu. Celý systém musí být navržen tak, aby vyhověl nárokům na účinné čerpání a minimalizaci tlaku v komoře. Nejvyšší tlakový rozdíl vzniká mezi komorou vzorku a prostorem zdroje elektronů – tubusem, ten lze udržet díky tlak omezujícím clonkám (PLA1 a PLA2 na Obr. 1.6) a účinném čerpání. Clony jsou opatřeny otvory s průměrem řádově desítek až stovek mikrometrů a umožňují účinné omezení proudění plynů mezi jednotlivými částmi mikroskopu a současně dovolují průchod elektronů od jejich zdroje až na vzorek. Právě na

clonkách PLA1 a PLA2 jsou zadány okrajové podmínky na vstupních a výstupních otvorech zkoumaného systému.



**Obr. 1.7: Diferenciální komora mikroskopu [3]**

V důsledku vysokého tlaku plynů v komoře vzorku EREM, dochází ke zvýšenému počtu interakcí elektronů s molekulami a atomy plynu, což má za následek rozptyl

primárního elektronového svazku. Rozptyl primárních elektronů roste zejména se zvyšujícím se tlakem a středním atomovým číslem plynu, pracovní vzdáleností a s klesajícím urychlovacím napětím svazku [3]. Tento rozptyl má za následek zvětšení průměru stopy primárního elektronového svazku, což se projeví zhoršením poměru signál - šum v detekovaném signálu a v konečném důsledku to může vést až ke zhoršení rozlišovací schopnosti mikroskopu [3]. Schopnost účinného čerpání této komory je kritickým požadavkem ovlivňujícím kvalitativní parametry mikroskopu, jako je např. maximální velikost tlaku plynu v komoře vzorku, množství šumu v detekovaném signálu úzce související s rozlišením mikroskopu atd. Jedním z hlavních kritérií na výsledný design komory diferenciálního čerpání je minimální velikost tlaku plynu v oblasti optické osy mikroskopu, tedy v blízkém okolí svazku primárních elektronů procházejících touto komorou.

## 2 Model proudění tekutiny

### 2.1 Základní pojmy z proudění tekutin

Existují dvě základní kategorie proudění tekutin:

- stlačitelné
- nestlačitelné

V tomto případě je použita teorii stlačitelného proudění tekutin. Kde jsou definovány tyto základní vzorce, rychlost zvuku v daném prostředí:

$$c = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}}, \quad (2.1)$$

kde  $p$  je tlak plynu a  $\rho$  je hustota plynu. Ovšem hustota plynu  $\rho$  je při výpočtech považována za konstantní a určuje jednu z počátečních podmínek, proto pro výpočet rychlosti zvuku bude použit vzorec:

$$c = \sqrt{\kappa R T}, \quad (2.2)$$

kde  $T$  je teplota plynu,  $R$  všeobecná plynová konstanta,  $\kappa$  je Poisonova konstanta. Poisonova konstanta udává poměr měrných tepelných kapacit za stálého tlaku a stálého objemu a platí, že:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}. \quad (2.3)$$

Machovo číslo je poměr rychlosti proudu plynu a rychlosti zvuku v daném prostředí. Tedy Machovo číslo je [7]:

$$M = \frac{v}{c} = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}, \quad (2.4)$$

kde  $c$  je rychlost zvuku,  $v$  je rychlost tekutiny. Je-li Machovo číslo  $M < 1$  je rychlost podzvuková,  $M > 1$  je rychlost supersonická a  $M > 5$  rychlost hypersonická.



Proudění se považuje prakticky za nestlačitelné, když se neprojeví změna hustoty plynu na probíhající proudění, v případě že platí pro hodnotu Machova čísla vhodně volená nerovnost [8]:

$$M \leq (0,2 - 0,3). \quad (2.5)$$

V případě splnění nerovnosti lze považovat i proudění plynu za proudění nestlačitelné tekutiny, tj. kapaliny. V případě nesplnění nerovnosti je proudění plynu považováno za proudění stlačitelné tekutiny. Hustota plynu  $\rho$  při výpočtu je proměnná a vyhovuje rovnici stavu ideálního plynu ve tvaru

$$p = R \rho T. \quad (2.6)$$

V případě jednorozměrného spojitého proudění ideálního plynu v trubici proměnného průtočného průřezu  $A$  platí pro určovací veličiny stavu proudu tekutiny rychlost  $v$ , tlak  $p$ , hustotu  $\rho$  a teplotu  $T$  parametrické závislosti na Machově čísle  $M$  a Poisonově konstantě  $\kappa$  [8]

$$\frac{A}{A_{kr}} = \frac{1}{M} \left[ \frac{2}{\kappa+1} \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}}, \quad (2.7)$$

$$\frac{v}{v_{kr}} = \frac{M}{\left[ \frac{2}{\kappa+1} \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (2.8)$$

$$\frac{p}{p_{kr}} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\kappa+1} \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}}, \quad (2.9)$$

$$\frac{\rho}{\rho_{kr}} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\kappa+1} \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa-1}}}, \quad (2.10)$$

$$\frac{T}{T_{kr}} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\kappa+1} \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]}. \quad (2.11)$$

Při uvažovaném jednorozměrném spojitým proudění v trubici proměnného průřezu definujeme následující tři charakteristické stavy proudění.

- Stav celkový (zbrzdění)  $v_0 = 0$ ,  $p_0$ ,  $\rho_0$ ,  $T_0$ ,  $M_0 = 0$ .
- Stav kritický  $v_{kr}$ ,  $p_{kr}$ ,  $\rho_{kr}$ ,  $T_{kr}$ ,  $M_{kr} = 1$ .
- Stav mezní  $v_m$ ,  $p_m = 0$ ,  $\rho_m = 0$ ,  $T_m = 0$ ,  $M_m = \infty$ .

Z rozboru charakteristických stavů proudění vyplývají významné poměry charakteristických veličin ve stavu celkovém, kritickém a mezním [9].

$$\frac{p_0}{p_{kr}} = \left( \frac{\kappa+1}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \quad (2.12)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_{kr}} = \left( \frac{\kappa+1}{2} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}, \quad (2.13)$$

$$\frac{T_0}{T_{kr}} = \frac{\kappa+1}{2}, \quad (2.14)$$

$$\frac{v_m}{v_{kr}} = \left( \frac{\kappa+1}{\kappa-1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.15)$$

Z rozboru rovnic popisujících jednorozměrné spojitě proudění ideálního plynu v trubici proměnného průřezu plyne důležitý závěr: „Zmenšování průtočného průřezu vede proudící plyn k jeho kritickému stavu, zatímco zvětšování průtočného průřezu proudící plyn od jeho kritického stavu oddaluje.“ [3]

K dosažení nadzvukového proudění v trubici proměnného průřezu je tedy třeba v podzvukovém proudu nejprve průřez trubice zmenšovat a po dosažení kritického stavu

proudění začít průřez trubice poté zvětšovat, aby bylo dosaženo v trubici nadzvukového proudění (tvarování Lavalovy dýzy, tj. konvergentní a divergentní dýza) [3].

V případě konvergentní dýzy (pouze zužující trubice) lze na výstupu z dýzy dosáhnout snížení tlaku v proudu plynu pouze na hodnotu kritického tlaku.

## 2.2 Typy proudění

Rovnice proudění tekutin jsou dobře známy. Rychlý rozvoj výpočetní techniky umožňuje řešit tyto rovnice přístupem, který se nazývá numerická simulace, což je jeden z nástrojů studia základních aspektů turbulence. Její hlavní výhodou je, že dává detailní informace o trojdimenzionálních strukturách, které nelze získat měřením v laboratoři [10].

### 2.2.1 Turbulentní proudění

V polovině minulého století zjistil a definoval Osborn Reynolds, že se skutečná tekutina může pohybovat laminárně (viz Obr. 2.2) a turbulentně (viz Obr. 2.1), tedy dvěma kvalitativně zcela odlišnými typy proudění. Turbulentní proudění nastává při vysokém tlaku. Je charakteristické vytvářením vírů a vratných proudů. Při turbulenci se vodivost potrubí zmenšuje [10]. Ve vakuové technice turbulentní proudění nastává především na začátku čerpání při tlaku větším než přibližně 20 kPa. Rozhraní mezi oběma druhy proudění udává Reynoldsovo kritické číslo  $R_e$ . To je dáno vztahem:

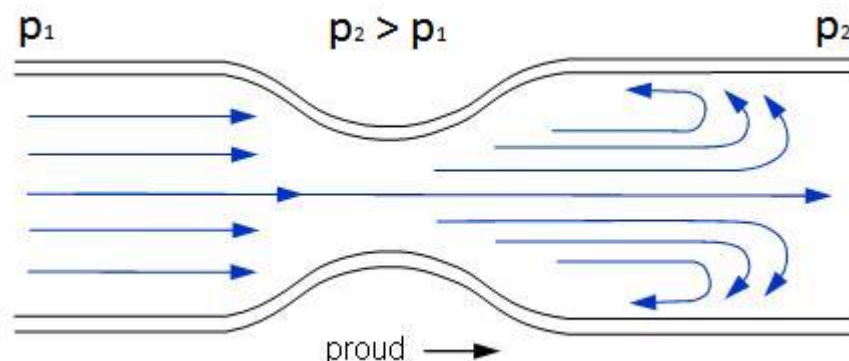
$$R_e = \frac{v_s \cdot d}{\nu}, \quad (2.16)$$

kde  $v_s$  je střední rychlost v potrubí,  $d$  je průměr a  $\nu$  kinematická viskozita.

Jeho hodnota je závislá na řadě parametrů např. na geometrii proudu, tlakovém spádu, atd. Pro potrubí kruhového průřezu je spodní mez asi 2 300.

Pro turbulentní proudění jsou typické pulsace všech veličin např. rychlostí. Trajektorie částic tekutiny jsou nepravidelné, dochází k intenzivnímu promíchávání celého objemu proudící tekutiny. Turbulentní proudění je trojrozměrný, časově proměnný pohyb tekutiny, při němž veličiny charakterizující proudění (rychlost, tlak, hustota, teplota) se mění nahodile v čase. Okamžité hodnoty veličin neustále kolísají kolem střední hodnoty,

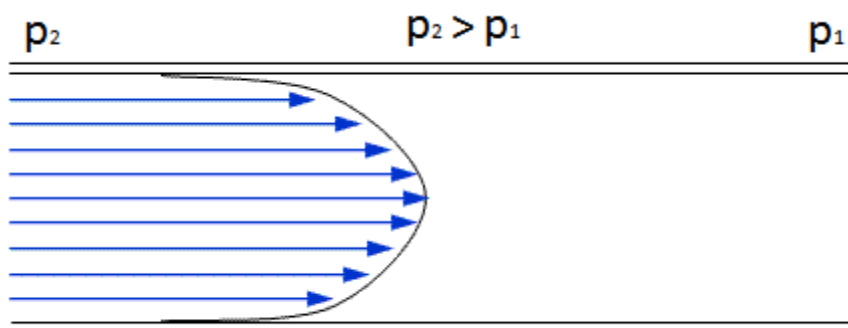
takže v každém okamžiku je například rychlost dána součtem střední rychlosti a flukтуаční složky. [11], [12]



**Obr. 2.1:** Schematické znázornění turbulentního proudění

### 2.2.2 Laminární proudění

U laminárního proudění se plyn pohybuje ve vrstvách rovnoběžných s osou trubice. Částice plynu se pohybují vedle sebe jakoby ve vrstvách – „destičkách“ (destička = lat. lamina), které se vzájemně nepromíchávají. Pohyb plynu se zpomaluje třením o stěny, jednotlivé vrstvy mají proto různé rychlosti. U stěny je rychlost pohybu plynu minimální, u osy maximální. Změna rychlosti proudění mezi jednotlivými vrstvami závisí na viskozitě plynu. Tento typ proudění se také označuje jako hydrodynamické nebo viskózní. [12]



**Obr. 2.2:** Schematické znázornění laminárního proudění

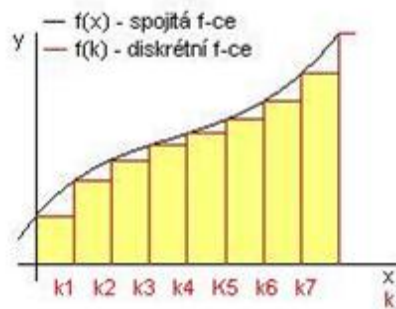
### 3 Metoda konečných objemů

V této kapitole byly použity následující zdroje literatury [8], [13], [14], [3], [15], [10], [16]

Metoda konečných objemů spočívá ve třech základních bodech:

- dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě,
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace,
- numerické řešení diskretizovaných rovnic v obecném tvaru, kde součet se provede přes sousední *buňky*  $i=N, S, E, W, F, B$  (což označuje sever-north, jih-south, východ-east, západ-west, vpřed-front, vzad-back (Obr. 6.2)).

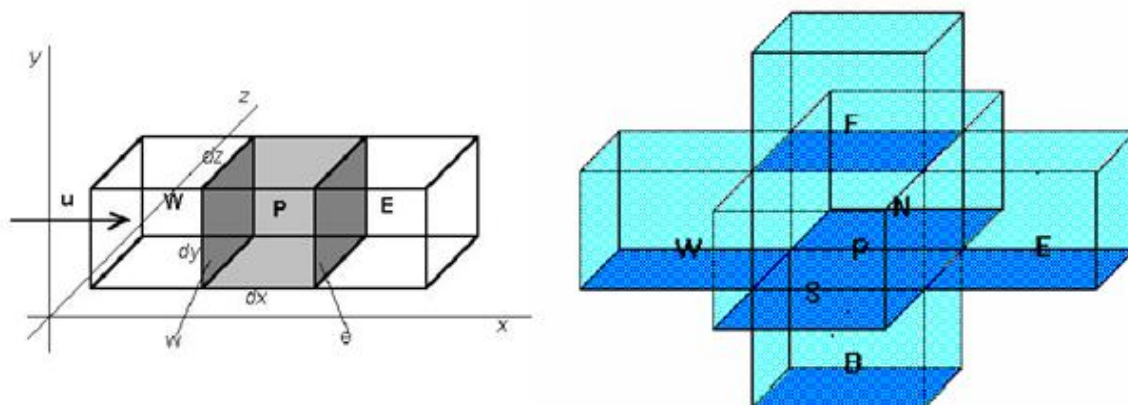
Diskretizací se nazývá náhrada spojitého prostředí (kontinua) systémem diskrétních bodů (viz Obr. 3.1). V těchto bodech se soustředí fyzikální parametry popisující stav či vlastnosti příslušného místa prostředí. Při studiu fyzikálních jevů se tím zpravidla nutnost řešení parciálních diferenciálních rovnic převádí na řešení obyčejných diferenciálních, popřípadě algebraických rovnic.



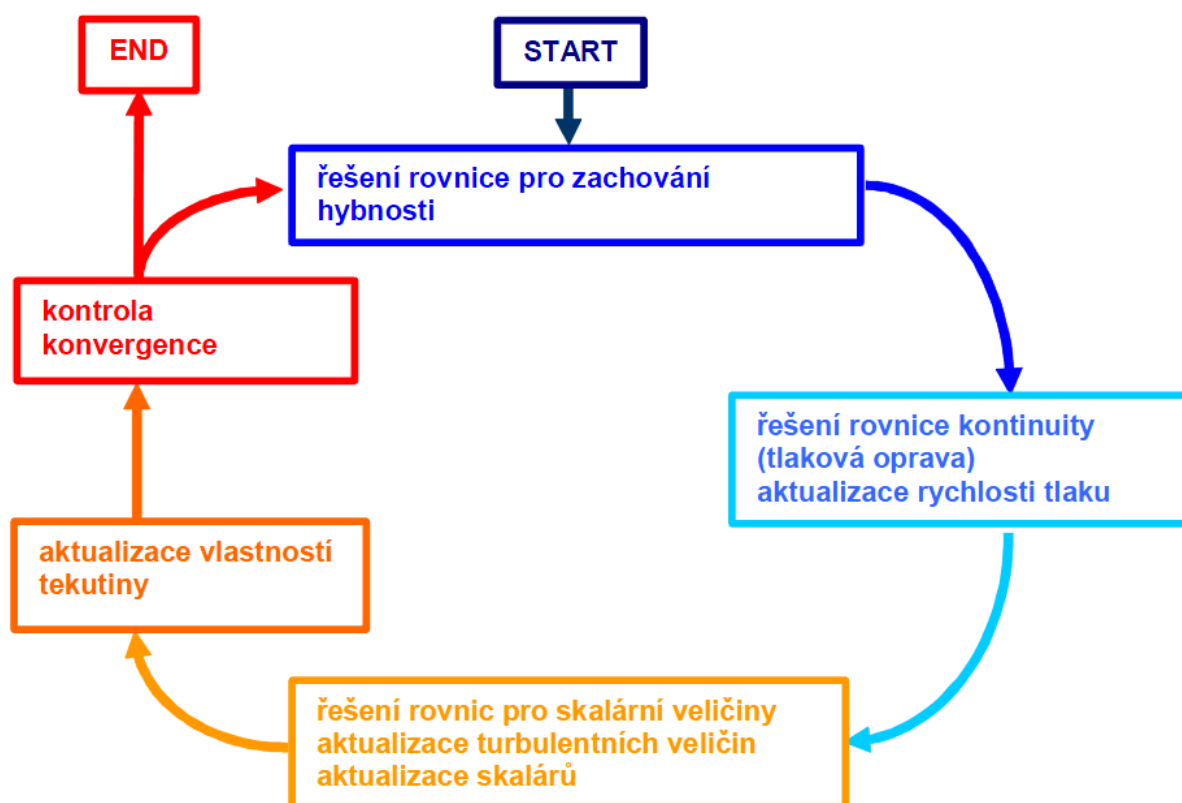
**Obr. 3.1: Diskretizace funkce**

Výpočet probíhá v jednotlivých cyklech, které se nazývají interace. Hodnoty okrajových podmínek působí na okolní buňky sítě a v celé oblasti probíhá pod tímto vlivem změna. Výpočet probíhá podle uvedených rovnic a na konci každého výpočtu nastává kontrola konvergence. Proto tento cyklus způsobil změnu sledovaných hodnot, (jak

bude uvedeno dále v této práci, půjde převážně o tlak, rychlost, hmotnostní tok a teplotu). Cyklus se opakuje až do chvíle, dokud nedojde k ustálení sledovaných hodnot (viz Obr. 3.3).



Obr. 3.2: Ovlivňující se sousední buňky u metody konečných objemů



Obr. 3.3: Cyklus výpočtu

Tato kapitola má za úkol jen velmi zjednodušeně a stručně nastínit způsob, jakým systém SolidWorks FlowSimulation® řeší daný výpočet, aby práce měla ucelený charakter, avšak podrobnější popis a studium je mimo rozsah této práce.

### 3.1 Diskretizace výchozích rovnic - numerické modelování

Pro matematické modelování procesů slouží výchozí soustava rovnic:

- **Rovnice kontinuity**
- **Momentové rovnice**

Rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

Momentové rovnice:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + (\bar{u}_j, \nabla) \bar{u}_i = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} \frac{2}{3} \rho_o k \right) \quad (3.2)$$

Rovnice pro výpočet pole potenciální teploty:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + (\bar{u}_j, \nabla) \bar{\theta} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{K}{\sigma_\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right) + \frac{Q}{\rho_o c_{p_o}} \quad (3.3)$$

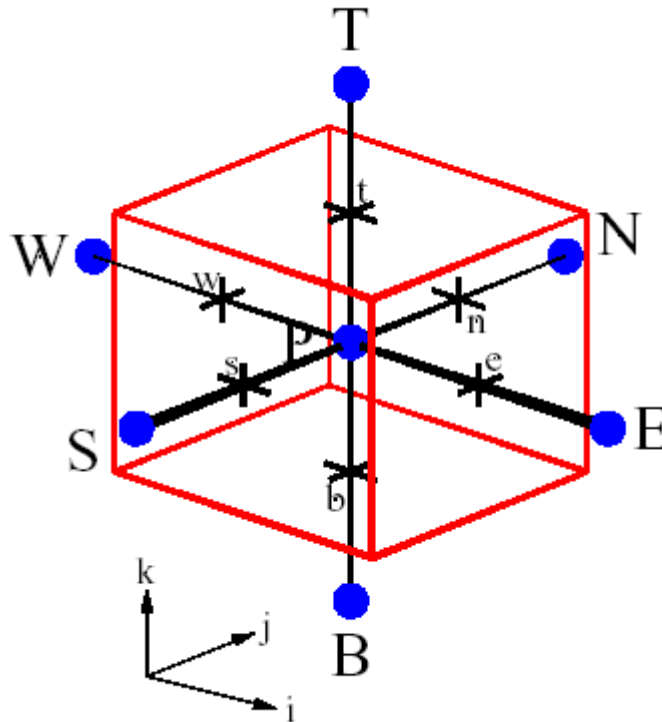
$K$  reprezentuje v tomto aproximativním případě koeficient izotropní (ale zpravidla nikoli prostorově a časově neměnné) turbulentní vazkosti, který je dopočítáván pomocí modelů turbulence různé složitosti.

Uvedené momentové rovnice odpovídají v daném tvaru RANS přístupu a jsou označovány jako Reynoldsovy. Vedle prezentovaného tvaru, kde difúzní člen koresponduje přesně s definicí newtonovské tekutiny, lze pro modelování pole proudění s jistým přiblížením vyjít i ze zjednodušené verze Reynoldsových rovnic:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + (\bar{u}_j, \nabla) \bar{u}_i = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.4)$$

Metoda konečných (nebo také kontrolních) objem vychází z integrace výchozích diferenciálních rovnic v lokálních objemových buňkách vymezených sítí a následný diferenční přepis v dané síti.

S ohledem na provedenou integraci a důsledky Gaussovy věty jsou stranové hodnoty počítaných proměnných násobeny stranovými plochami (obecně) neortogonálních objemových elementů. Resp. aplikace Gaussovy věty v rámci objemu quasi pravidelného (šestistranného) elementu reprezentuje přepis gradientu proměnné na její difference vymezené vzdáleností protilehlých stran, přičemž její hodnoty v místech středů (stran) jsou násobeny plochami těchto stran (normála protilehlých stran má samozřejmě opačný smysl – proto difference). Metoda konečných objemů tedy důsledně reflektuje kontinuitu (v objemovém elementu)

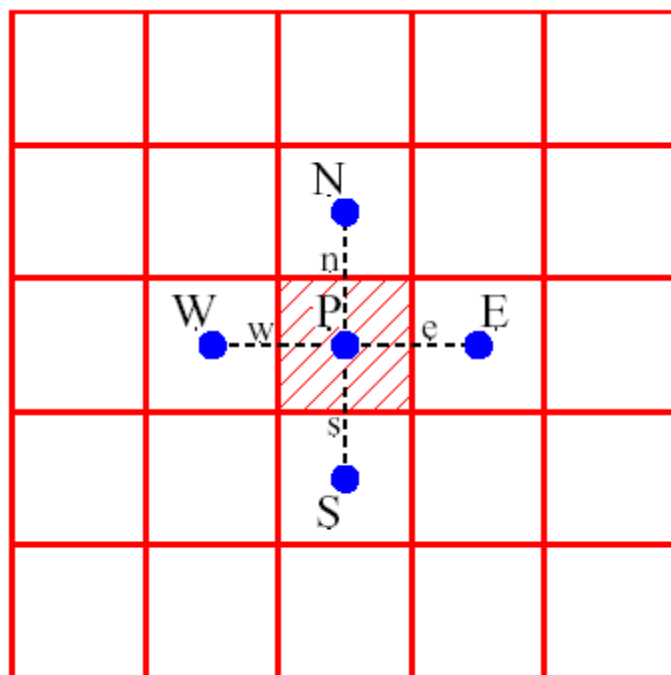


Obr. 3.4: Objemový element



$$\begin{array}{ccccccc}
 V \frac{d}{dt} \phi & + & \sum_{i=1}^6 a \frac{1}{\Delta r} A_i (u_r \phi & - & \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial r}) & = & SV \\
 \text{čas. změna} & & \text{boční strany} & \text{advekce (konvekce)} & \text{difúze} & & \text{zdrojový člen (tlak difference)}
 \end{array}$$

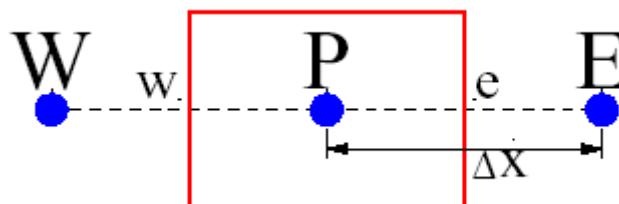
$\Phi$  – počítaná proměnná např.  $u_x$  složka,  $A_i$  stranové plochy,  $\Gamma \equiv K$ ,  $a = +1$

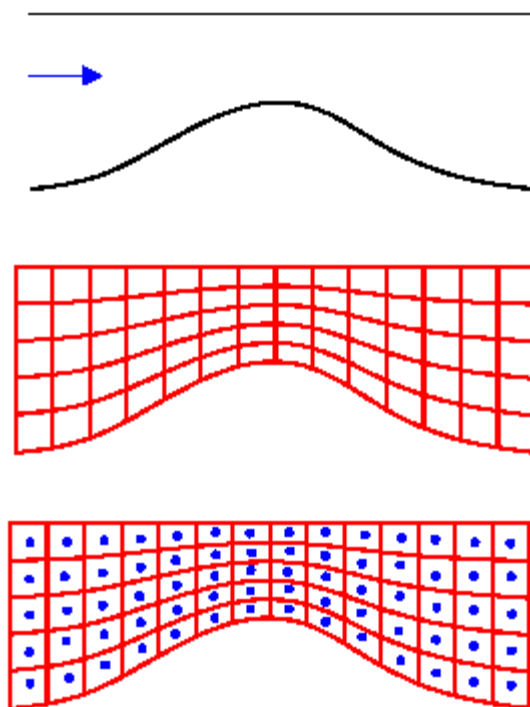


**Obr. 3.5:** Vložení výpočtového elementu v síti a směr působení na okolní buňky

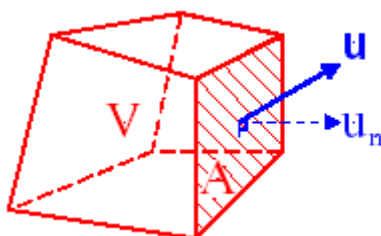
Difúzní člen:

$$-\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \Big|_e \rightarrow -(\Gamma A)_e \left( \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} \right)$$





Obr. 3.6: Neortogonální síť - "boundary-fitted coordinate" (BFC) systém



Síť je téměř vždy volena jako neortogonální (nepravoúhlá) – vyčíslení derivací definovaných v globálních (fyzikálních či kartézských) souřadnicích vyžaduje transformaci souřadnic.

### 3.2 Transformace souřadnic

Pro transformaci souřadnic mezi fyzikálním prostorem (globální souřadnice  $x_i, x_j, x_k \equiv x, y, z$ ) a zobecněným výpočetním prostorem (lokální souřadnice) obecně platí:

$$\xi = \xi(x, y, z), \quad \eta = \eta(x, y, z), \quad \zeta = \zeta(x, y, z)$$

Pro parciální derivace pak:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} &= \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} + \zeta_x \frac{\partial}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial}{\partial y} &= \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} + \zeta_y \frac{\partial}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial}{\partial z} &= \xi_z \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_z \frac{\partial}{\partial \eta} + \zeta_z \frac{\partial}{\partial \zeta}\end{aligned}\tag{3.5}$$

V maticovém tvaru:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x_\xi & y_\xi & z_\xi \\ x_\eta & y_\eta & z_\eta \\ x_\zeta & y_\zeta & z_\zeta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_x & \eta_x & \zeta_x \\ \xi_y & \eta_y & \zeta_y \\ \xi_z & \eta_z & \zeta_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \zeta} \end{Bmatrix}\tag{3.6}$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \mathbf{J} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \zeta} \end{Bmatrix}\tag{3.7}$$

Transformace derivací v lokálních souřadnicích do fyzikálního prostoru globálních souřadnic je realizována inverzní Jacobiho maticí.

$$\mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} y_\eta z_\zeta - y_\zeta z_\eta & x_\zeta z_\eta - x_\eta z_\zeta & x_\eta y_\zeta - x_\zeta y_\eta \\ y_\zeta z_\xi - y_\xi z_\zeta & x_\xi z_\zeta - x_\zeta z_\xi & x_\zeta y_\xi - x_\xi y_\zeta \\ y_\xi z_\eta - y_\eta z_\xi & x_\eta z_\xi - x_\xi z_\eta & x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi \end{bmatrix}\tag{3.8}$$

$$J = \det \mathbf{J}$$

Je nutno invertovat  $\mathbf{J}$  reprezentovanou průměty globálních  $x, y, z$  do lokálních souřadnic majících v rámci daných diferencí rozměr 1.

Pro nejjednodušší typ sítě – která zavádí prakticky nejmenší „míru“ nepravouhlosti, lze vyvodit:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} x_\xi & 0 & z_\xi \\ 0 & y_\eta & z_\eta \\ 0 & 0 & z_\zeta \end{bmatrix} \quad J = \det \mathbf{J} = x_\xi y_\eta z_\zeta \quad (3.9)$$

$$\mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} y_\eta z_\zeta & 0 & 0 \\ 0 & x_\xi z_\zeta & 0 \\ -y_\eta z_\xi & -x_\xi z_\eta & x_\xi y_\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_\xi} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{y_\eta} & 0 \\ -\frac{z_\xi}{x_\xi z_\zeta} & -\frac{z_\eta}{y_\eta z_\zeta} & \frac{1}{z_\zeta} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Tj.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} &= \frac{1}{x_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial y} &= \frac{1}{y_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial z} &= -\frac{z_\xi}{x_\xi z_\zeta} \frac{\partial}{\partial \xi} - \frac{z_\eta}{y_\eta z_\zeta} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{1}{z_\zeta} \frac{\partial}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (3.11)$$

### 3.3 Základní rovnice popisující proudění v řešené komoře

Pro řešení numerické simulace je použit program Cosmos FloWorks, který řeší trojrozměrný typ proudění stlačitelné, vazké tekutiny s přívodem tepla. To je matematicky popsáno třemi parciálními diferenciálními rovnicemi spolu se stavovou rovnicí.

Ze základních rovnic popisujících proudění vazké stlačitelné tekutiny v karteziánské souřadné soustavě v konzervativním tvaru vznikly tři zákony. První je zákon zachování hmotnosti, druhým je zákon zachování pohybu a třetím je zákon zachování energie. Tyto tři zákony jsou doplněny rovnicí stavu uvažované tekutiny.

Rovnice spojitosti, vyjadřující zákon zachování hmotnosti, nabývá tvaru:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad , \quad \text{složka } i = 1, 2, 3 \quad . \quad (3.12)$$

Stokes – Navierova rovnice, vyjadřující aplikovanou Newtonovu větu o změně hybnosti, ve tvaru:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad \text{index } j=1, 2, 3, \quad (3.13)$$

Rovnice energie, vyjadřující zákon zachování energii pro stlačitelnou tekutinu, nabývá tvaru:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} (E + p) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad (3.14)$$

$$E = e + \frac{v^2}{2}. \quad (3.15)$$

V uvedených rovnicích  $u$  je rychlost tekutiny,  $p$  je tlak tekutiny,  $\rho$  je hustota tekutiny,  $T$  je teplota tekutiny,  $e$  je vnitřní energie,  $S_i$  jsou vnější hmotnostní síly působící na jednotku hmotnosti (kupř. tíhová, odstředivá),  $Q_H$  je přívod či odvod tepla vztažený na jednotku objemu,  $q_i$  je tok tepla difusní,  $\tau_{ik}$  je tensor vazkých napětí a  $ij$  jsou indexy u veličin udávající sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace).

Výše uvedené základní rovnice pro řešení proudění stlačitelné tekutiny s uvažováním tření, vyjadřující zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Zákony tvoří systém parciálních diferenciálních rovnic a lze je vyjádřit vhodným zápisem v obecné konzervativní formě,

$$\frac{\partial (\rho \zeta)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \zeta) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \right) + S_\zeta, \quad (3.16)$$

kde  $\zeta$  je proměnná a členy na pravé straně diferenciální rovnice jsou postupně konvektivní člen, difúzní člen a zdrojový člen.

Pro zákon zachování hmotnosti platí pro proměnnou  $\zeta = 1$  a pravá strana rovnice obsahuje pouze konvektivní člen. Tedy:

$$\zeta = 1, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i), \quad \text{složka } i=1, 2, 3. \quad (3.17)$$

Pro zákon zachování hybnosti platí pro proměnnou  $\zeta = u_i$  a pravá strana rovnice obsahuje konvektivní člen, difúzní člen, zdrojový člen a tlak. Tedy:

$$\zeta = u_i, \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad \text{index } j=1,2,3 \quad (3.18)$$

Pro zákon zachování energie platí pro proměnnou  $\zeta = E + p$ ,  $E = e + u^2/2$ , kde  $e$  je vnitřní energie a pravá strana rovnice obsahuje konvektivní člen, difuzní člen, zdrojový člen a turbulentní viskozitu  $\mu_t$  a rychlostí disipace  $\varepsilon$ . Tedy:

$$\zeta = E, \quad \frac{\partial \rho E}{\partial t} = -\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}(E + p) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i\right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H$$

$$E = e + \frac{u^2}{2}, \quad e \text{ je vnitřní energie} \quad (3.19)$$

Pokud člen  $\zeta$  představuje skalární veličinu, jde o lineární rovnici druhého řádu, pokud  $\zeta$  představuje složku rychlosti, jde o nelineární rovnici druhého řádu. Převládá-li vliv difúzního členu, jedná se o rovnice eliptické. Převládá-li vliv konvektivního transportu, jde o rovnice parabolické a vliv významných tlakových změn popisují rovnice hyperbolické.

Pro Newtonské tekutiny tenzor vazkových napětí je definován vztahem

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right). \quad (3.20)$$

Reynoldsova napětí tvoří tenzor o devíti členech, přitom nezávislých je šest, proto je i rovnic šest, což tvoří rozsáhlý systém diferenciálních rovnic obtížně řešitelných. Proto je věnována pozornost teoriím, zabývajícím se jednodušším vyjádřením Reynoldsových napětí v rovnici (tzv. modely turbulence).

S využitím Boussinesquovy hypotézy nabývá tenzor Reynoldsových vazkových napětí upravený tvar, ve kterém je zavedena je turbulentní viskozita  $\mu_t$  a turbulentní kinetická energie  $k$ . V rámci modelu  $k$ - $\varepsilon$  turbulence, který je založený na dvou základních vlastnostech turbulence, a to na turbulentní kinetické energii  $k$  a turbulentní disipaci  $\varepsilon$ , lze určit turbulentní viskozita  $\mu_t$ . K určení turbulentní kinetické energie  $k$  a rychlosti disipace  $\varepsilon$  jsou pak použity dvě transportní rovnice (dvourovnicový  $k$ - $\varepsilon$  model, kterým se základní rovnice popisující proudění vazké tekutiny doplňují o dvě parciální diferenciální rovnice).

S využitím Boussinesquovy hypotézy nabývá tenzor Reynoldsových vazkých napětí upravený tvar, ve kterém je zavedena je turbulentní viskozita  $\mu_t$  a turbulentní kinetická energie  $k$

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad . \quad (3.21)$$

Zde  $\delta_{ij}$  je Kroneckerova delta funkce (je rovna jedné pro  $i = j$  a rovna nule pro ostatní případy),  $\mu$  je dynamická viskozita, (pro laminární proudění platí  $\mu_t = k = 0$ ).

V rámci modelu  $k$ - $\varepsilon$  turbulence, který je založený na dvou základních vlastnostech turbulence, a to na turbulentní kinetické energii  $k$  a turbulentní disipaci  $\varepsilon$ , lze určit turbulentní viskozita  $\mu_t$

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad . \quad (3.22)$$

Zde  $f_\mu$  je faktor turbulentní viskozity, který je definován vztahem

$$f_\mu = \left[ 1 - \exp(-0.025 R_y) \right]^2 \cdot \left( 1 + \frac{20.5}{R_T} \right), \text{ kde } R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}, R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu} \quad . \quad (3.23)$$

V rovnici je vzdálenost od stěny označena  $y$ .

K určení turbulentní kinetické energie  $k$  a rychlosti disipace  $\varepsilon$  jsou použity dvě transportní rovnice

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad , \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon \quad , \end{aligned} \quad (3.24)$$

kde zdrojové členy  $S_k$  a  $S_\varepsilon$  jsou definovány vztahy

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon - \mu_t P_B$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left( f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} , \quad (3.25)$$

Zde  $P_B$  reprezentuje generaci turbulence způsobené vztlakovými silami, může být vyjádřena vztahem

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} , \quad (3.26)$$

kde  $g_i$  je složka gravitačního zrychlení ve směru  $x_i$  ,  $\sigma_B = 0,9$  je konstanta,  $C_B$  je konstanta pro kterou platí  $C_B = 1$  pro  $P_B > 0$  a  $= 0$  pro ostatní případy:

$$f_1 = 1 + \left( \frac{0,05}{f_\mu} \right)^3 , \quad f_2 = 1 - \exp(-R_T^2) . \quad (3.27)$$

Konstanty  $C_\mu = 0,09$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$  ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  jsou určeny empiricky pro Cosmos FloWorks v uvedených hodnotách.

Když Lewisovo číslo  $Le = 1$  pak difusní tok tepla  $q_i$  je definován vztahem

$$q_i = \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i} , \quad i = 1, 2, 3. \quad (3.28)$$

Zde  $\sigma_c = 0,9$  je konstanta,  $Pr$  je Prandtlovo číslo a  $h$  je entalpie tekutiny.

Tyto rovnice popisují jak laminární tak turbulentní proudění. Přejchod z laminárního do turbulentního proudění a naopak je možný. Parametry  $k$  a  $\mu_t$  jsou nulové pro čisté laminární proudění.

### 3.4 Okrajové a počáteční podmínky řešení

Pro řešení parciální diferenciální rovnice s proměnnou  $\zeta$  je potřebné znát počáteční a okrajové podmínky řešené proměnné.



Základní okrajové podmínky proudění mohou být různého typu:

- Podmínky pro vstup a výstup proudu - lze je definovat pomocí tlaku nebo rychlosti. Speciální výstup se často definuje pomocí podmínek prvního druhu, tj. derivace podle normály je rovna nule (nulový normálový gradient).
- Podmínky na stěně - stěna může být nepohyblivá nebo pohyblivá (např. rotující nebo klouzající, se třením nebo bez tření, hladká nebo drsná).
- Podmínky symetrie - nulová normálová rychlost a nulové normálové gradienty všech hledaných veličin.
- Podmínky periodické (cyklické) – používají se v případě, kdy se opakují proudové útvary, mohou být rotačního typu a translačního typu, kdy se umožňuje definování tlakového spádu ve směru proudící tekutiny po celé délce oblasti.
- Všechny typy podmínek mohou být časově závislé, pokud to vyžaduje jejich charakter.

Další okrajové podmínky se netýkají proudění jako takového, ale dalších veličin vyplývajících ze složitosti matematického modelu, jako je skalární veličina teplota, teplotní toky, radiace, hmotnostní zlomky (resp. molové zlomky) příměsí apod.

## **Praktická část práce**

## 4 Zadání podmínek v SolidWorks FloSimulation

### 4.1 Nastavení sítě

Tento typ komory lze brát jako symetrický, tedy lze jej počítat jako poloviční úlohu symetrické oblasti. Tím se čas potřebný pro výpočet zkracuje na polovinu.

Pro výpočty proudění plynu se nejprve musí nastavit síť, tedy oblast daného výpočtu. Důležitým parametrem sítě je velikost a počet jednotlivých buněk. Pro větší oblasti diferenciálně čerpané komory je nastavena globální velikosti buněk v síti. Na místech kde se předpokládá složitější proudění, či místa kritická, se síť zjemní. To má ovšem za následek, prodloužení času pro výpočet.

Bylo použito následné zjemnění sítě:

- Přibližně 4 násobné zjemnění v kuželové části
- Přibližně 64 násobné zjemnění ve válcové části v oblasti průchodu primárního svazku elektronů

Ukázka zjemnění sítě, jeho rozložení v pozorované oblasti a v celém objemu diferenciálně čerpané komory je vidět na Obr. 4.1 a Obr. 4.2

**Tabulka 4.1 Základní nastavení velikosti sítě**

	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>rozměr X</b>	<b>rozměr Y</b>	<b>rozměr Z</b>
<b>SHORT</b>	40	13	30	162 mm	70 mm	118 mm
<b>HIGH</b>	40	13	30	160 mm	70 mm	118 mm
<b>HIGH-CONE</b>	40	13	30	160 mm	70 mm	118 mm
<b>HIGH-CONE-FANWISE</b>	40	13	30	158,5 mm	70 mm	118 mm
<b>HIGH- FANWISE</b>	40	13	30	160 mm	70 mm	118 mm
<b>MIDDLE</b>	40	13	30	162 mm	70 mm	118 mm
<b>LOW-CONE</b>	40	13	30	156,5mm	70 mm	118 mm

V nastavení sítě se dále určuje, jaké má být nastavení v oblasti zúžení, kanálků, ostřejších přechodů, oblasti zakřivených ploch a další prvky, viz Tabulka 4.2. Toto nastavení bylo použito u všech výpočtů.

**Tabulka 4.2 Doplnující nastavení sítě**

<b>Solid/Fluid Interface (Oblast přechodu těles a tekutin)</b>	
Small solid features refinement level (Úroveň zjemnění v oblasti malých částic)	2
Curvature refinement level (Úroveň zjemnění v oblasti zakřivených ploch)	1
Curvature refinement criterion (Kriterium zjemnění v oblasti zakřivených ploch)	0,157878012
Tolerance refinement level (Úroveň tolerance zjemnění)	1
Tolerance refinement criterion (Kriterium tolerance zjemnění)	$1,265 \cdot 10^{-5}$ m

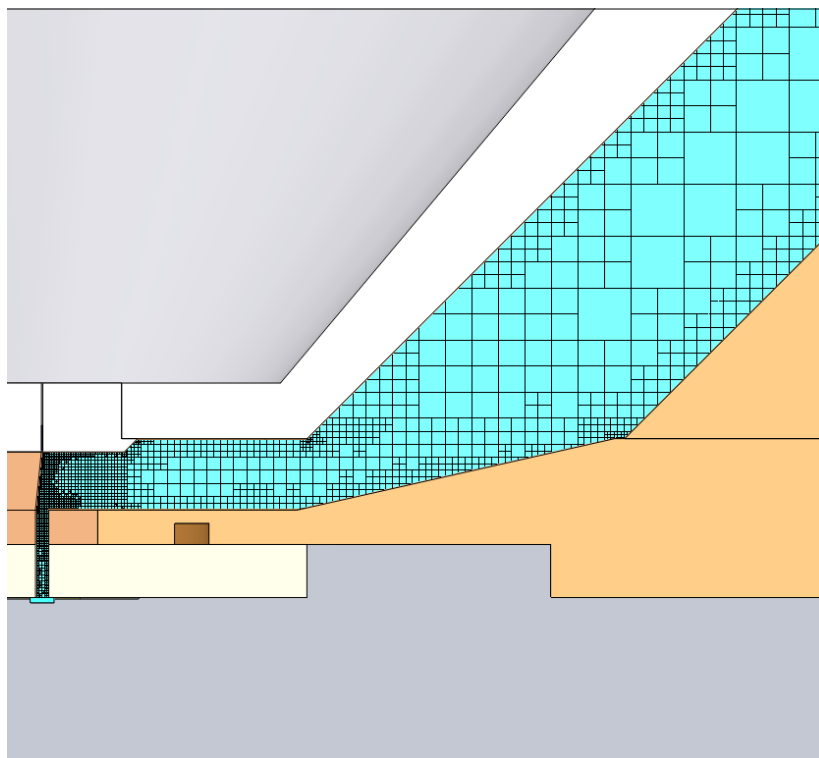
<b>Narrow channels (oblast úzkých kanálků)</b>	
Advanced narrow channel refinement (Pokročilé zjemnění úzkých kanálků)	On
Characteristic number of cells across a narrow channel (Charakteristický počet buněk v úzkém kanálku)	5
Narrow channels refinement level (Úroveň zjemnění v úzkém kanálku)	2

The minimum height of narrow channels (Minimální rozměr úzkého kanálku)	Off
The maximum height of narrow channels (Maximální rozměr úzkého kanálku)	Off

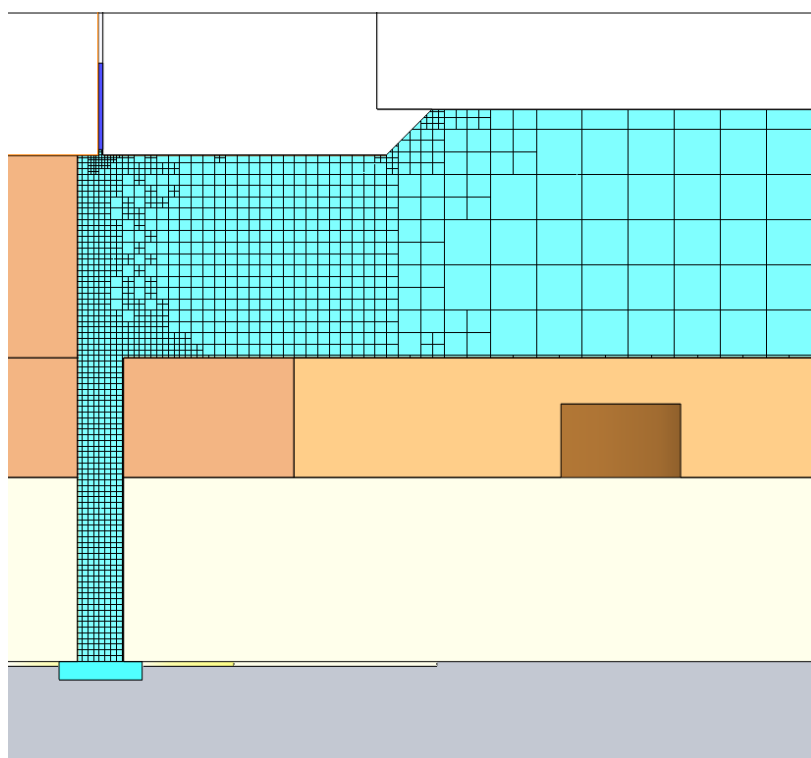
System dále umožňuje i nastavení tzv. adaptivního zjemňování, kdy sám během výpočtu provede doplňující zjemňování oblasti podle předem nastavených kritérií. Konkrétní použití je uvedeno v Tabulka 4.3

**Tabulka 4.3 Nastavení adaptivního zjemnění sítě**

Refinement level (Úroveň zjemnění)	2
Refinement criterion (Kriterium zjemnění)	2
Unrefinement criterion (Kriterium rušení zjemnění)	0,15
Adaptive refinement in fluid (Úroveň adaptivního zjemnění v oblasti proudění)	On
Use global parameter variation (Využití globálního parametru kolísání)	Off
Approximate maximum cells (Maximální počet buněk)	1 650 000
Refinement strategy (Nastavení strategie zjemňování sítě)	Periodic
Units (Způsob ukončení výpočtu)	Travels
Relaxation interval (Interval uvolnění)	0,4
Periodic refinement options (Podmínky periodického zjemnění)	Start: 1 Period: 0,5



**Obr. 4.1: Ukázka nastavení sítě High-cone-fanwise**

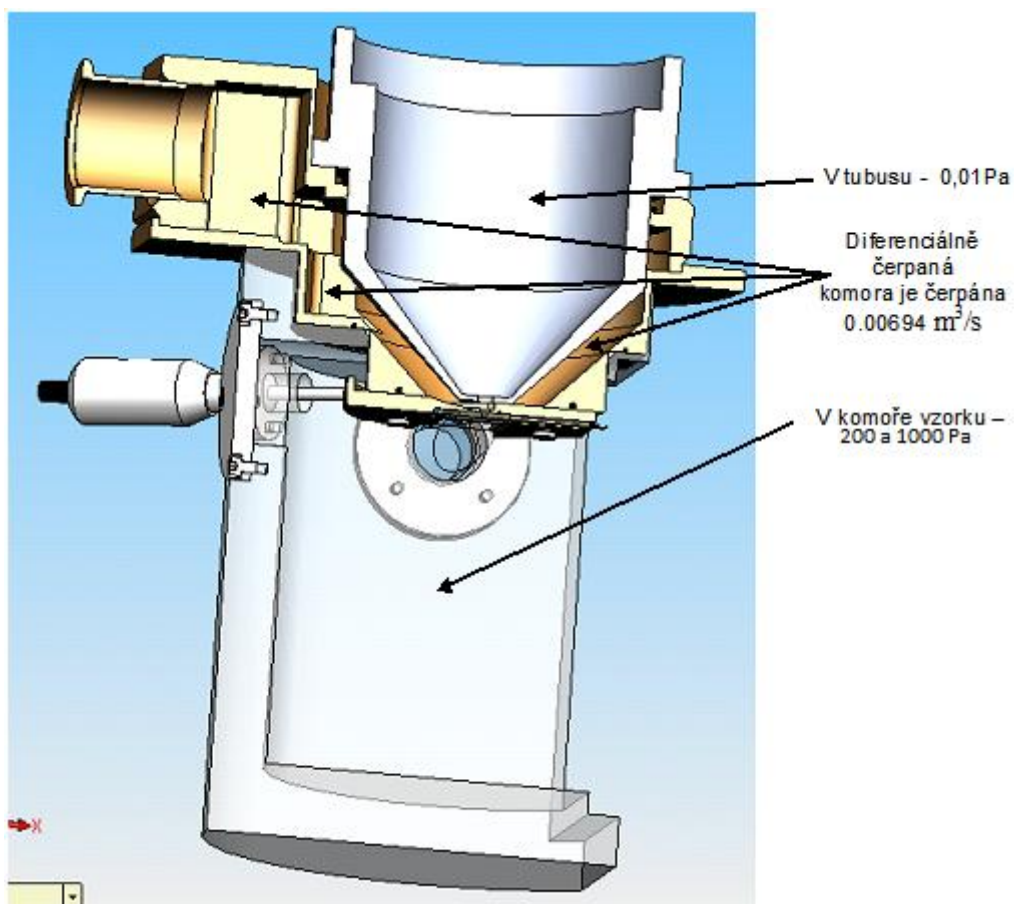


**Obr. 4.2: Detail sítě u High**

## 4.2 Nastavení okrajových podmínek

Pro konečný výsledek výpočtů je potřeba nastavit okrajové podmínky. Okrajové podmínky jsou v tomto případě dány počtem otvorů (vstupů/výstupů) do diferenciálně čerpané komory. Do komory vedou 3 otvory:

- **Na cloně PLA 2** s otvorem o průměru 0,05 mm umístěné mezi tubusem mikroskopu a diferenciálně čerpanou komorou byla stanovena podmínka statického tlaku 0,01 Pa
- **Na cloně PLA 1** s otvorem o průměru 0,5 mm oddělující prostor diferenciálně čerpané komory a komory vzorku mikroskopu, byla stanovena hodnota tlaku 200 a 1000 Pa. Tato hodnoty představují nejběžněji používané minimální a maximální hodnoty tlaku v komoře vzorku
- **Hrdlo** – čerpací otvor, který je čerpán rychlostí  $0,00694 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pro výpočet byla nastavena rychlost čerpání  $0,00347 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tedy poloviční rychlost rotační vývěvy. To vyplývá ze symetrie oblasti, tedy výpočtu jen poloviny oblasti



Obr. 4.3: Hodnoty nastavení okrajových podmínek v elektronovém mikroskopu

### 4.3 Cíle vlastního výpočtů

Jako posledním krokem nastavení výpočtů u Cosmos FloWorks je zadání hledaných cílů. Tedy které výpočty se mají vyhodnotit. V tomto případě tedy:

- průběh statického tlaku v komoře,
- průběh rychlosti toku média v komoře, včetně Machova čísla,
- průběh hmotnostního toku na otvorech komory včetně čerpacího otvoru.
- zároveň je nastaveno sledování průběhu teploty v diferenciálně čerpané komoře.



## 5 Zpracování výsledků analýzy

Systém Cosmos FloWorks umožňuje zpracovávat výsledky mnoha způsoby. V uvedeném případě jsou využity především výsledky, podle kterých je možné určit tu variantu diferenciálně čerpané komory, u které při čerpání plynu bude mít primární svazek elektronů nejméně rušený průběh.

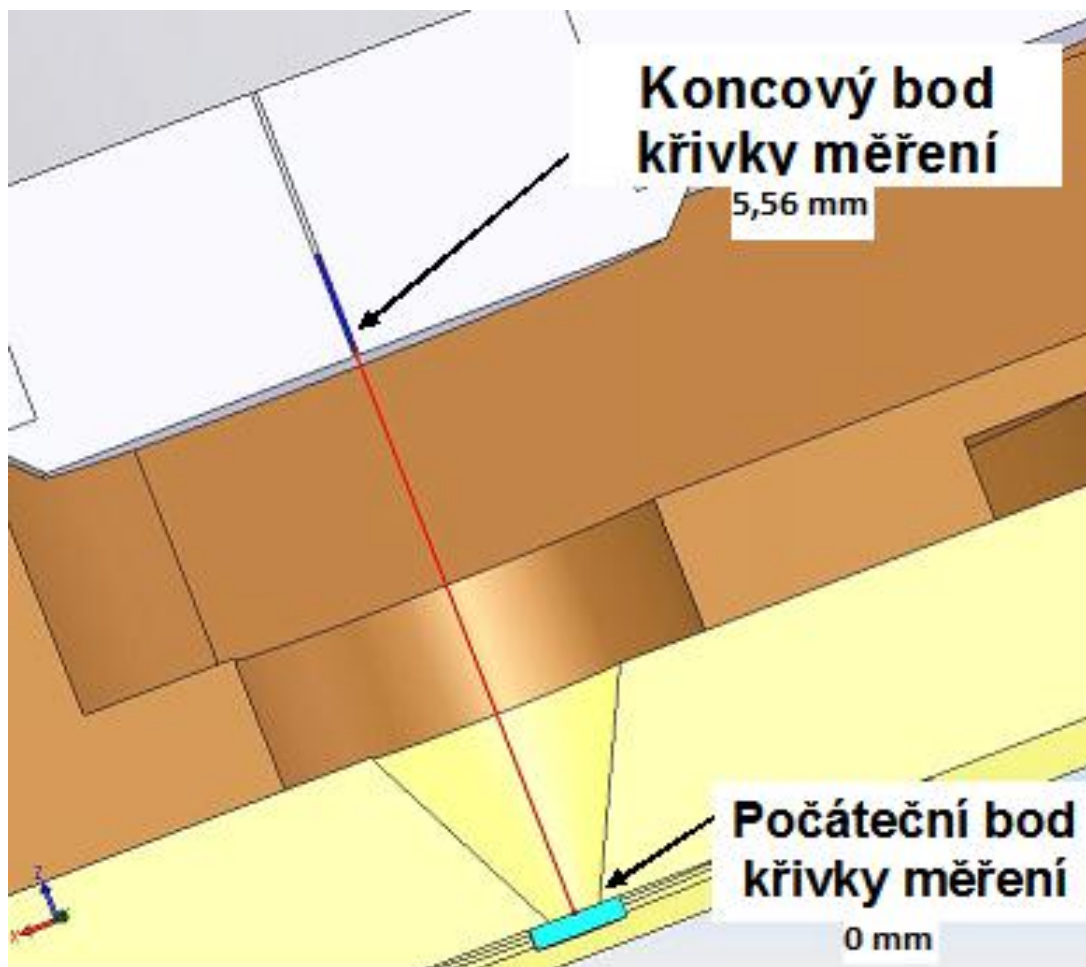
Z předchozího měření v semestrálních projektech, bylo vybráno sedm nejvýhodnějších tvarů a to:

- **Low cone**
- **High cone fanwise**
- **High cone**
- **High**
- **Short**
- **High fanwise**
- **Middle**

Tyto varianty byly podrobně zkoumány a analyzovány. Vybrané, grafické, obrázkové a tabulkové výsledky jsou uvedeny v Příloze 1 a 2. Další měření zbylých variant jsou uvedeny v Příloze 3 v elektronické podobě na přiloženém DVD.

### 5.1 Vyhodnocení prostoru dráhy primárního svazku elektronů

Především analyzujeme průběh tlaku na dráze primárního svazu elektronů při průchodu diferenciálně čerpanou komorou (na Obr. 5.1 vyznačena červenou přímkou). Přímka byla tvořena směrem od otvoru hrdla vstupujícího do komory vzorku směrem k otvoru vstupujícího do tubusu. To znamená, že na dále uvedených grafech hodnota délky nula začíná u komory vzorku a zvyšující hodnota směřuje směrem k tubusu.



**Obr. 5.1: Dráha průchodu primárního elektronového svazku**

Na dále uvedených grafech jsou vyneseny závislosti, kde na ose X je vždy vynesena délka přímky zobrazující dráhu sekundárních elektronů a na ose Y průběh zkoumaných veličin.

Výsledky tohoto měření systém vynáší do tabulkových podob. Tyto výsledky jsou z důvodu přehlednosti práce uvedeny v Příloze 1. V této kapitole jsou uvedeny pouze náhledy na vyhodnocené výsledky.

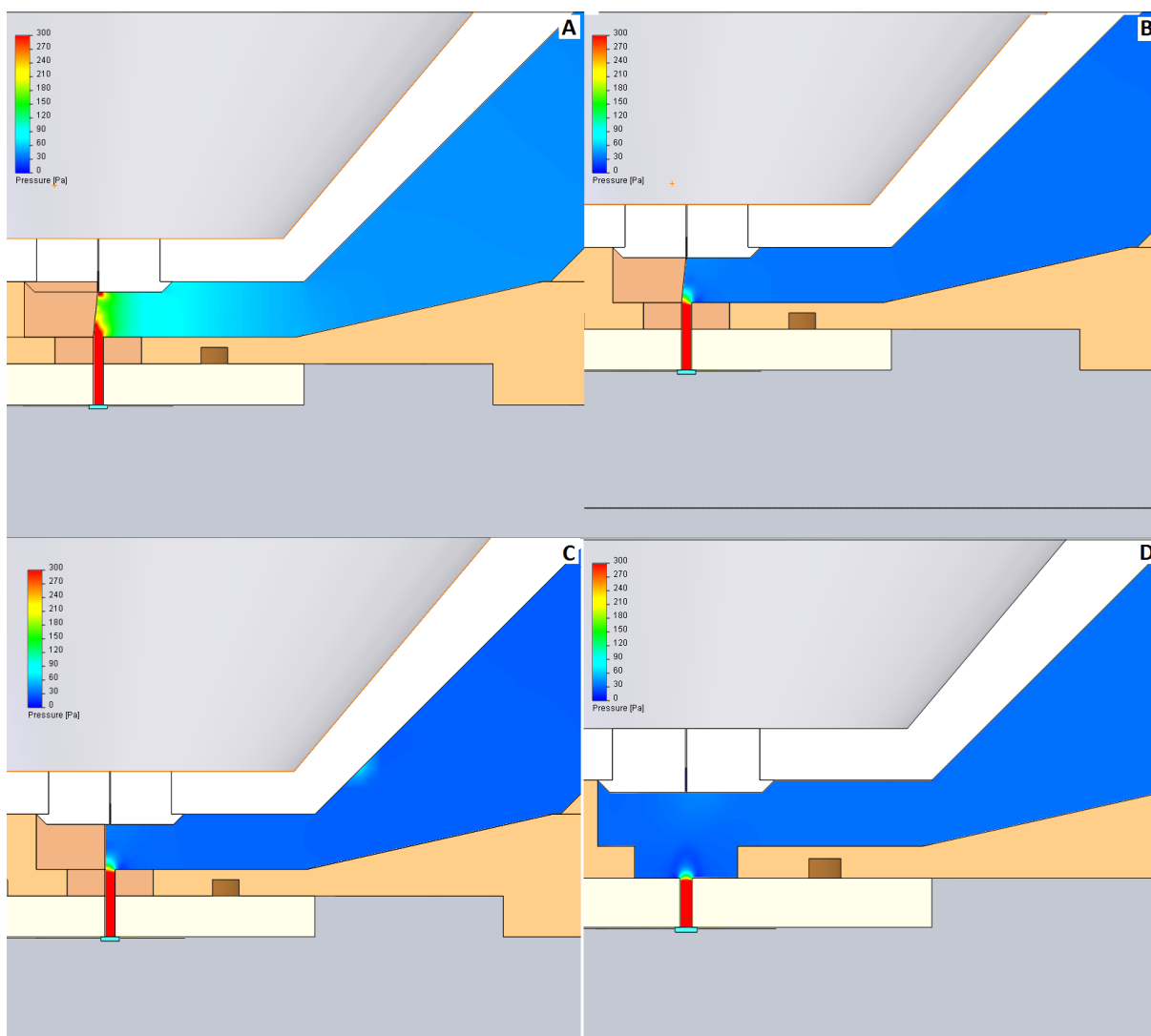
## 5.2 Grafický výstup

V první řadě můžeme sledovat průběh tlaků v diferenciálně čerpané komoře – především v místě primárního svazku. Tento výstup je částečně uveden zde na obrázcích

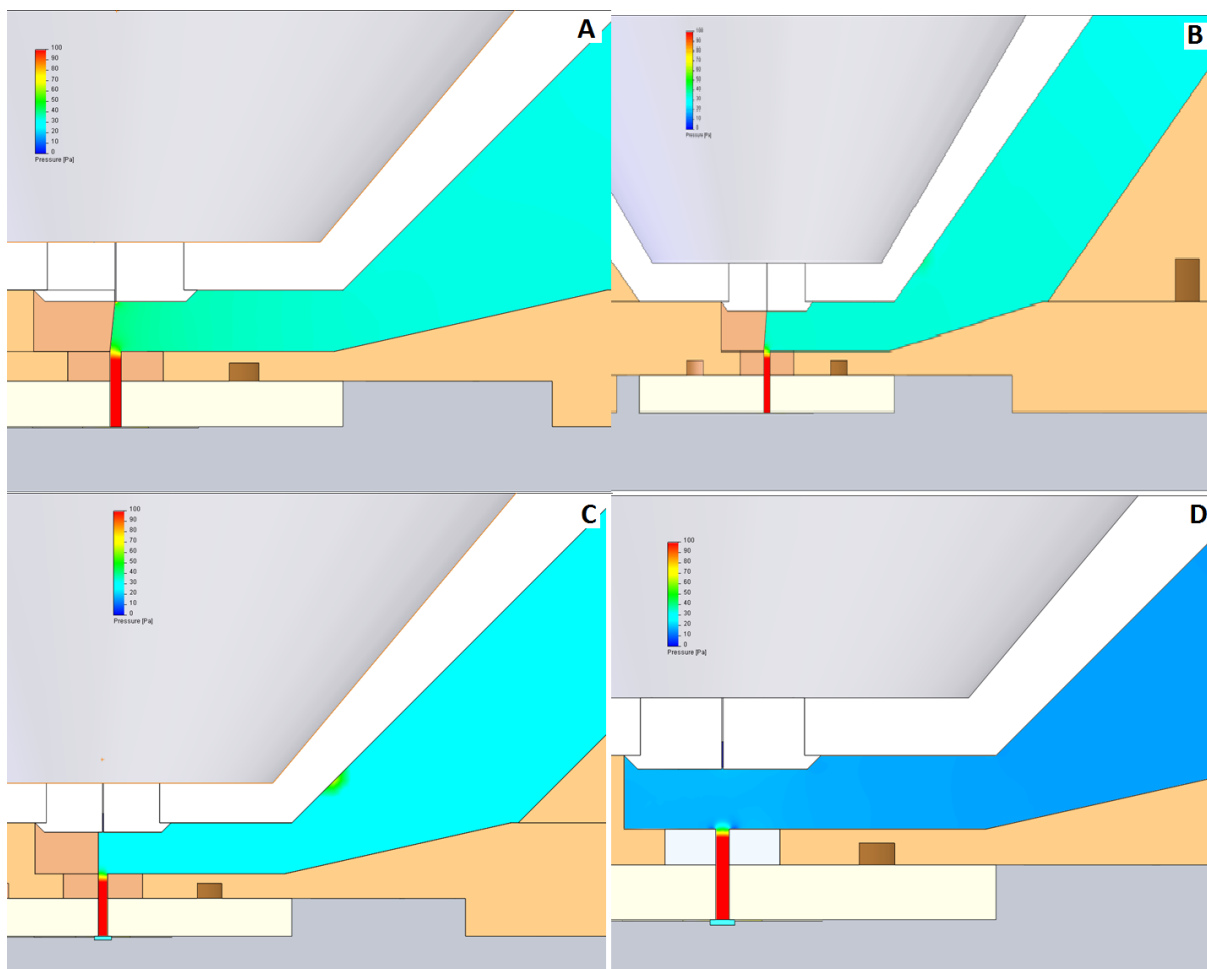
Obr. 5.2 a Obr. 5.3 a podrobněji v Příloze 2. Tato grafická znázornění slouží pro první orientaci.

I když především sledujeme průběh hodnoty tlaků, pro popis proudění jsou nutné i ostatní veličiny jako je např.: hodnota Machova čísla, teplota plynu, hustota plynu a rychlost proudění. Proto např. na Obr. 5.5 jsou naznačeny vektory rychlosti proudění. Tyto sledované hodnoty pro vybrané tvary jsou uvedeny v Příloze 2, pro všechny ostatní v elektronické podobě v Příloze 3 na DVD.

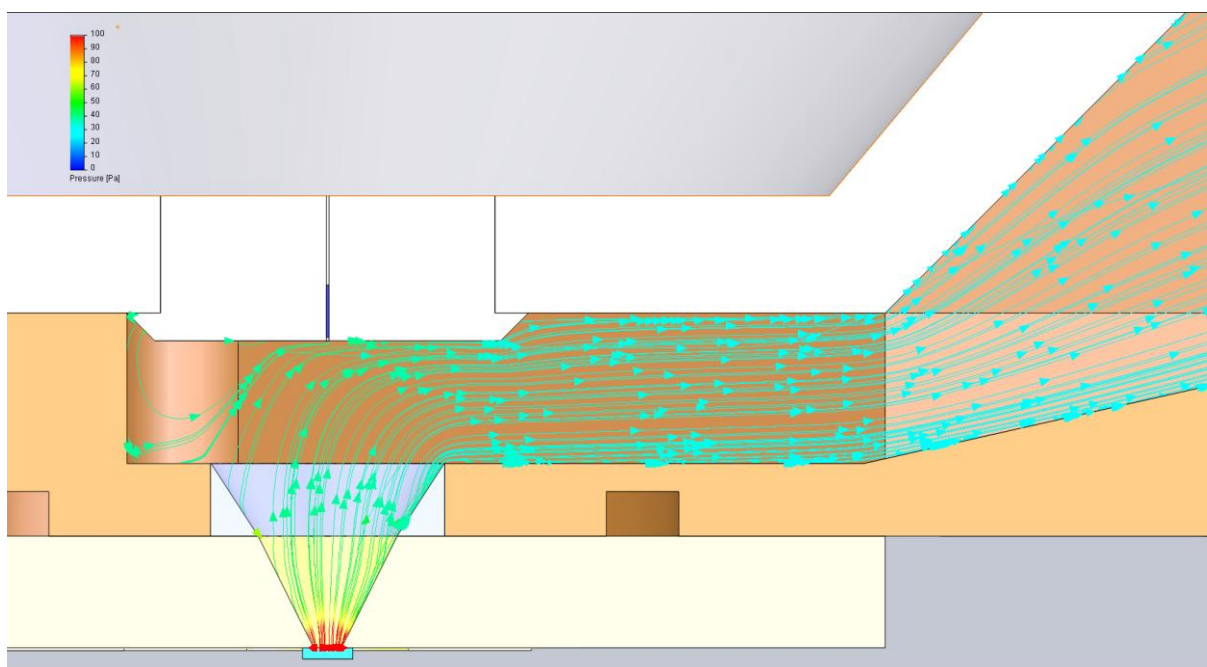
Na Obr. 5.4 je znázorněna další možnost zobrazení nabízená programem Solid Works. Jedná se o průběhy vektorů proudu plynu se znázorněným tlakem v dané oblasti.



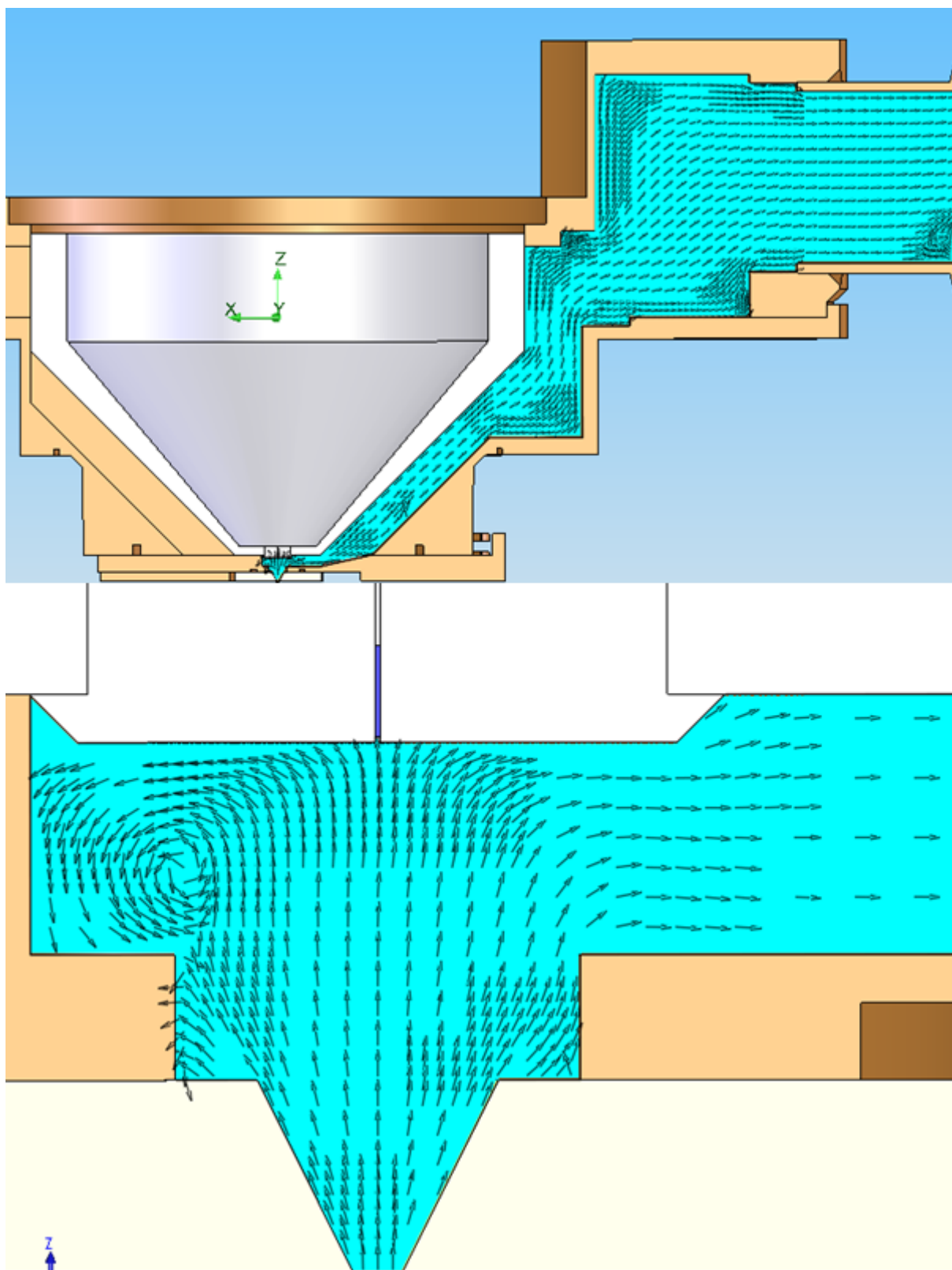
**Obr. 5.2: Ukázka změn tlaku při změně tvaru clonky pro hodnoty tlaku 1000 Pa; A) Hight-cone-fanwise; B) Hight-cone C) Hight; D) Short**



Obr. 5.3: Ukázka změn tlaku při změně tvaru clonky pro hodnoty tlaku 200 Pa; A) Hight-cone-fanwise; B) Hight-cone C) Hight; D) Short



Obr. 5.4: Průběh vektorů proudění plynu a statického tlaku ve variantě 200 Pa Low-cone



Obr. 5.5: Grafická ukázka zobrazení vektorů rychlosti proudění – Short

## 6 Vyhodnocení nejvýhodnější varianty clony diferenciálně čerpané komory

Při hledání optimálního tvaru diferenciálně čerpané komory, byla považována oblast průchodu primárního svazku elektronů. Kvalitativní parametry, jako je např.: šum v detektorovém systému způsobeným rozptylem svazku, max. tlak plynu v komoře vzorku, atd, jsou dány kvalitou čerpání této komory. Jedním z hlavních kritérií na výsledný design komory diferenciálního čerpání je minimální velikost tlaku plynů v oblasti optické osy mikroskopu, tedy v blízkém okolí svazku primárních elektronů procházejících touto komorou.

Na Obr. 6.1A je dráha primárního svazku znázorněna červenou čarou. Tento prostor je totožný u všech analyzovaných tvarů. Liší jen okolním tvarem.

V předchozích semestrálních projektech bylo zkoumáno 7 předběžně vybraných tvarů diferenciální komory v oblasti průchodu primárního svazku, ze kterých byl vybrán optimální tvar. Seznam těchto tvarů je uveden v Tabulka 4 a graficky znázorněn na Obr. 6.1.

**Tabulka 4: Seznam vybraných tvarů clonek**

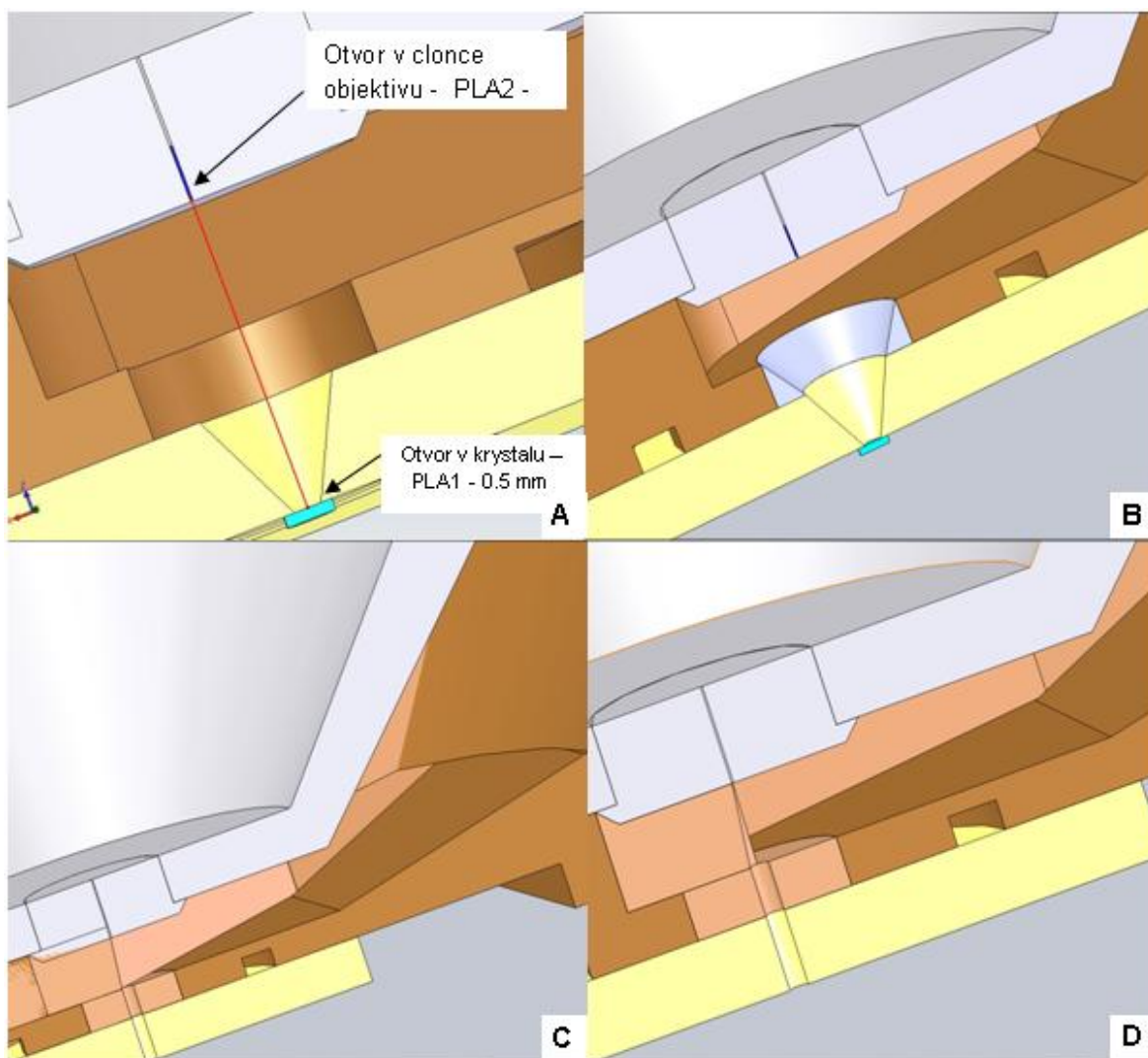
Low-cone	Obr. 6.1 B
High-cone-fanwise	Obr. 6.1 C
High-cone	Obr. 6.1 D
High	Obr. 6.1 E
Short	Obr. 6.1 F
High-fanwise	Obr. 6.1 G
Middle	Obr. 6.1 H

Tyto varianty byly vymodelovány pomocí systému SolidWorks a za pomoci modulu Cosmos FloWorks, díky kterému je možné analyzovat proudění plynů, byl podle uvedených požadavků hledán nejvhodnější tvar.

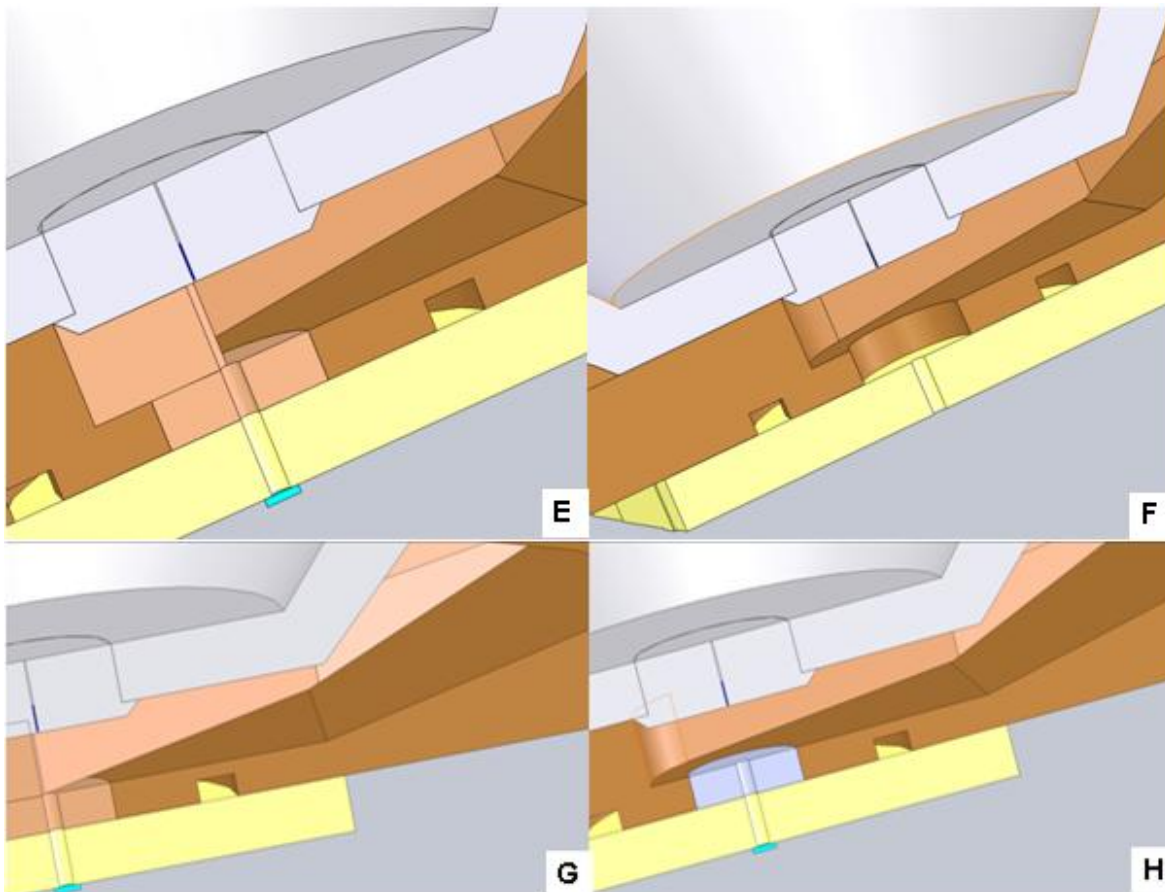
Z výsledků uvedených v grafu na Obr. 6.2 vyplývá, že typy s úzkým a delším kanálem nejsou vhodné. Nejvýhodněji vychází varianty Short a Low-cone.

Tento jev vychází ze zákonitosti takzvaného kritického proudění, které vzniká na hraně otvoru malé dimenze oddělující oblasti s velkým tlakovým spádem. Ve zkoumaném případě se jedná o spád mezi komorou vzorku a diferenciálně čerpanou komorou na cloně PLA 1

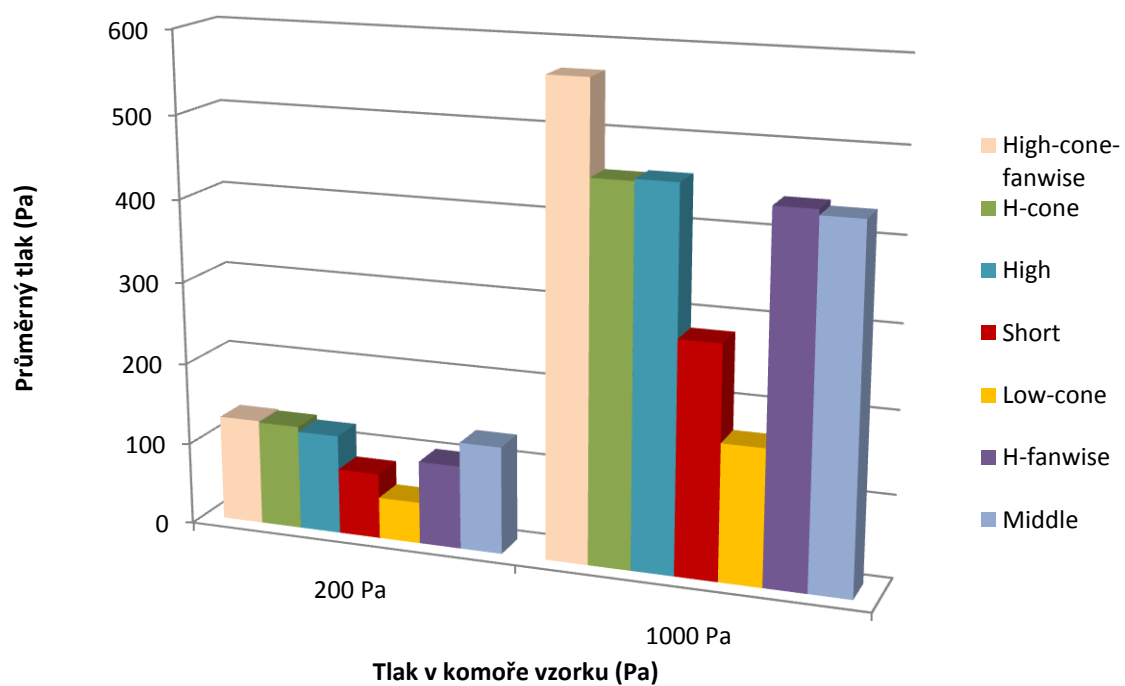
Pro detailnější představu o průběhu tlaku u všech zkoumaných variant a rychlosti proudění média v pozorované oblasti slouží souhrnný graf na Obr. 6.3. Nejnižší tlak je patrný z části A pro 1000 Pa a části C pro 200 Pa, který odpovídá tvarům Short a Low-cone. Hlavním důvodem snížení tlaku je kritické proudění, které je patrné v části B, kdy u těchto tvarů dosahuje plyn nejvyšší rychlosti v nejkratším čase.





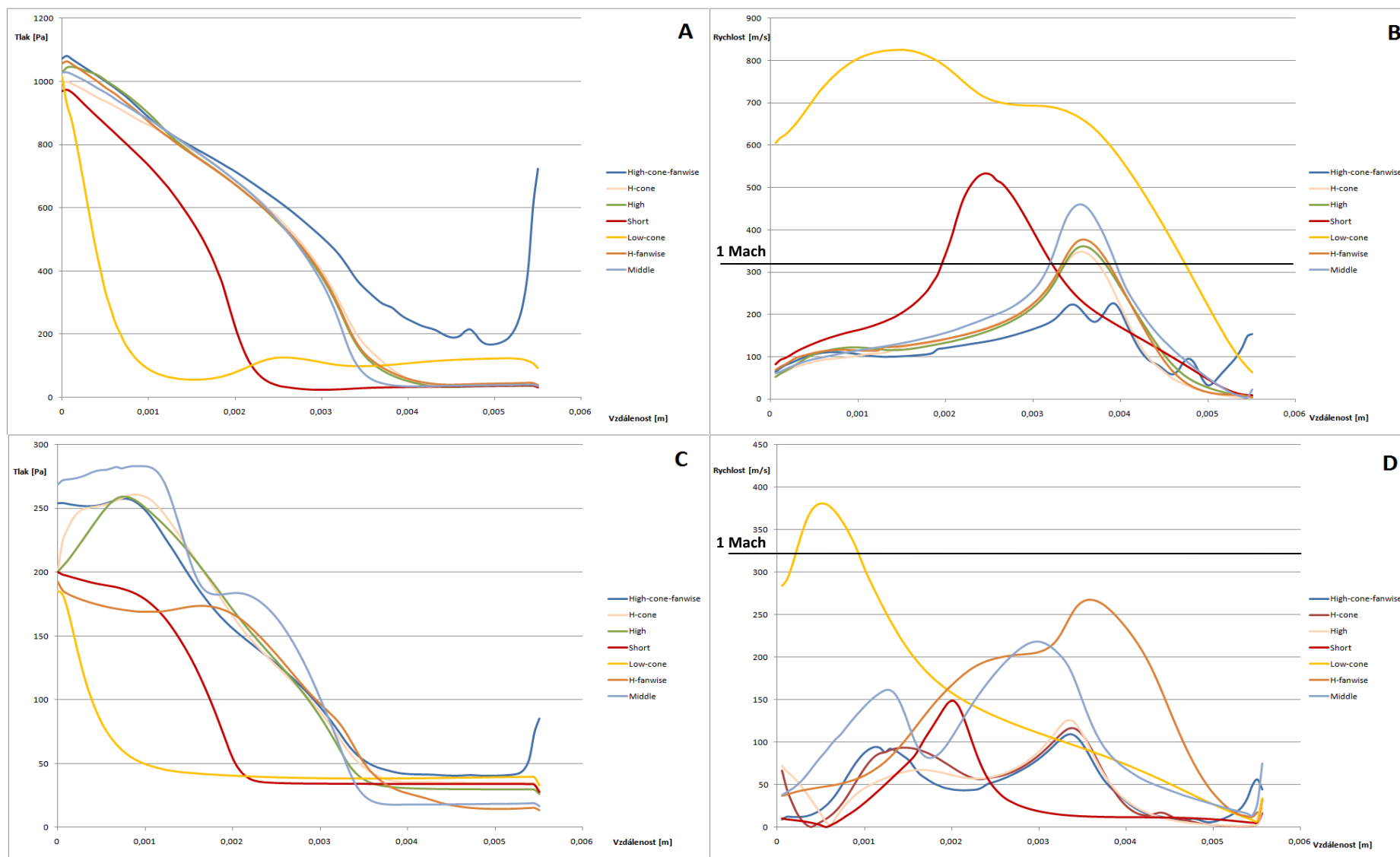


Obr. 6.1: Náhled na vybrané tvary popsané v tabulce 4



Obr. 6.2: Graf průměrného tlaku v pozorované oblasti pro varianty 200 Pa a 1000 Pa





Obr. 6.3: Grafy průběhu tlaku a rychlosti průtoku pro varianty 1000 Pa a 200 Pa – A,B varianta 1000 Pa; C,D varianta 200 Pa

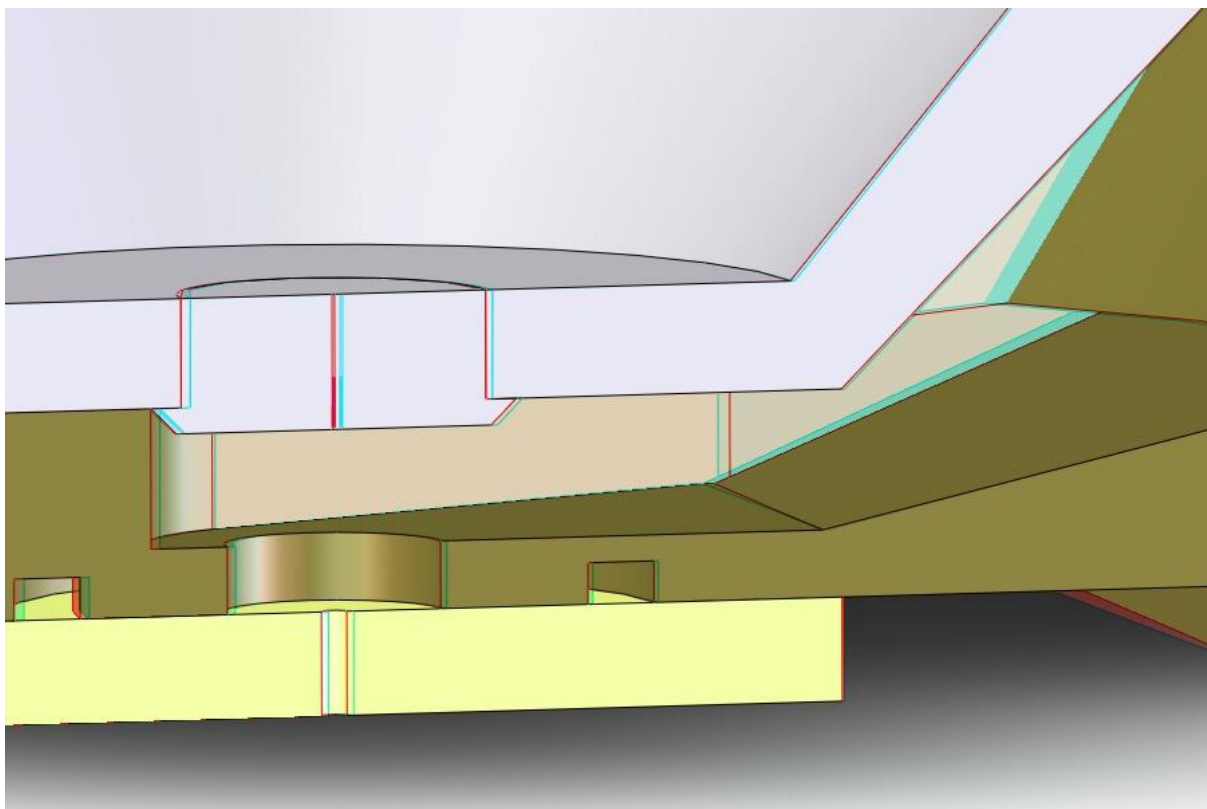
Celý průběh znázorněný na Obr. 6.3, je jasným důkazem platnosti fyzikálních zákonů proudění tekutin. Snížením rozptylu primárního elektronového svazku lze dosáhnout kritického proudění v nejkratším možném čase (na hranici nejvyššího tlakového spádu, v tomto případě mezi clonkou a samotnou diferenciálně čerpanou komorou) a následně nejrychlejšího odčerpání plynu. Tomuto poznatku nejvíce odpovídá tvar Low-cone, kde je přechod mezi clonkou a diferenciálně čerpanou komorou snížen na absolutní minimum a rozšířením do kužele je následně zajištěn maximální odtah vzduchu.

Dalším výhodným tvarem je Short. Zde je využito jen rozšíření prostoru pro odčerpávání. Oblast mezi clonkou a diferenciálně čerpanou komorou, kde dochází ke vzniku kritického proudění, je zvětšen oproti Low-cone.

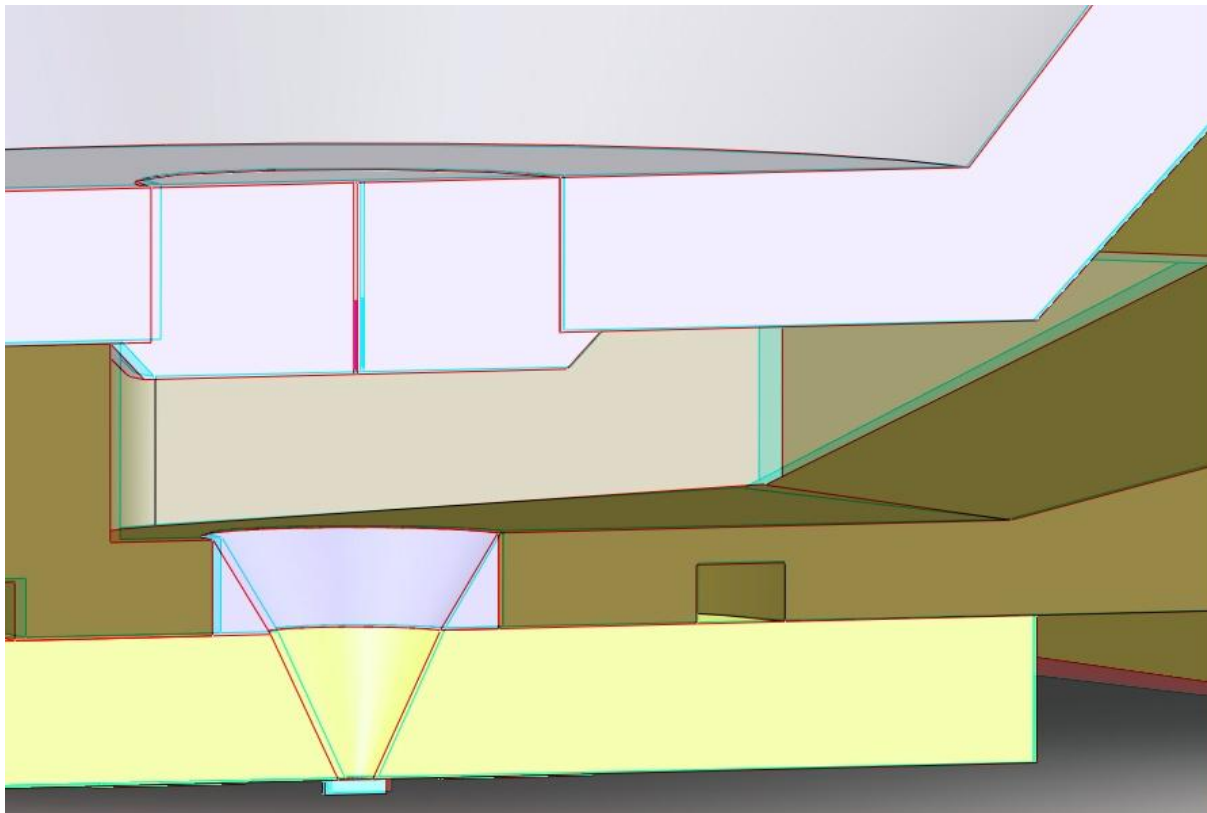
Všechny ostatní varianty tvarů dýzy jsou z důvodu své konstrukce vyhodnoceny jako nevyhovující. Hlavním důvodem je příliš vysoký průměrný tlak v oblasti primárního svazku elektronů.

## **6.1 Real 3D zobrazení nejvýhodnějších tvarů**

Novým trendem v zobrazovací technice je reálné zobrazení 3D (stereoskopického) obrazu. 3D obrazy jsou označovány snímky, ve kterých je možné spatřit objekty v prostoru. Pro dosažení prostorového 3D vjemu je nezbytné, aby pozorovatel viděl objekt každým okem z jiného úhlu. K tomu je zapotřebí speciálních projekčních systémů nebo 3D brýlí [30]. Na Obr 6.4 a 6.5 je možné si prohlédnout prostorové vyobrazení nejvýhodnějších tvarů. K reálnému zobrazení je zapotřebí speciálních 3D brýlí, které jsou přiloženy k tištěné práci. Tyto speciální brýle poskytla společnost FEI Czech Republic, s.r.o. K vytvoření 3D obrazů byla použita 30ti denní zkušební verze programu Zoner 3D Photo Maker [31].



**Obr. 6.4: Stereoskopické zobrazení varianty Short**



**Obr. 6.5: Stereoskopické zobrazení varianty Low-cone**

## 7 Závěr

Díky velkému rozvoji výpočetní techniky je možné simulovat proudění plynů pomocí tzv. CAE systémů (Computer Aided Engineering – počítačová podpora inženýrských prací). Získání numerických modelů proudění plynu v dráze primárního svazku elektronů v diferenciálně čerpané komoře environmentálního elektronového mikroskopu za pomoci CAE bylo hlavním cílem této práce. Jde převážně o simulaci využití kritického proudění a vyhodnocení ideálního tvaru clonky v závislosti na tlaku.

Celá práce byla rozdělena na dvě základní kapitoly, a to obecné seznámení s elektronovou mikroskopií, která se prolíná s teoretickou částí a praktickou částí analýz.

V úvodní kapitole popisující elektronové mikroskopy jsou rozlišeny dva základní typy elektronových mikroskopů. Transmisní elektronové mikroskopy (TEM) a skenovací elektronové mikroskopy (SEM). Nadstavbou SEM je environmentální elektronový mikroskop (ESEM). Právě u ESEM je použita přídavná komora k čerpání plynu mezi komorou vzorku a tubusem – diferenciálně čerpaná komora. Takto vytvořená komora je zde umístěna z důvodu velkého tlakového spádu mezi tubusem s vysokým vakuem a komorou vzorku s vysokým tlakem plynu (v řádu několika tisíc Pascalů). Toto umístění komory s sebou nese řadu problému, mj. rozptyl primárního svazku elektronů v důsledku srážek elektronů s molekulami plynu. Těmto srážkám se dá zabránit vhodným tvarem clonky umístěné na hrdlo diferenciálně čerpané komory.

Teoretická část se opírá o všeobecné poznatky v odvětví turbulentního a laminárního proudění tekutin. To vše je doplněno matematickými vzorci z oblasti konečných objemů, diskretizací rovnic numerického modelování a rovnicemi popisujícími proudění v konkrétní komoře.

Na teoretickou část navazují kapitoly s analýzami již konkrétních typů clonek. Při konstrukci vybraných clonek byla řešena problematika nejvýhodnějšího tvaru pro odčerpávání plynu tak, aby primární svazek elektronů procházel oblastí s nejnižším tlakem. Za pomoci fyzikálních vlastností kritického proudění (překročení rychlosti zvuku) byl v oblasti průchodu primárního svazku snížen tlak na minimum. To mělo za následek snížení srážek elektronů s molekulami plynu na minimum, respektive snížení rozptylu paprsku elektronů.

Podle předchozích měření bylo vybráno sedm nejvýhodnějších tvarů clonek (viz kapitola 6 Tabulka 4). Tyto tvary byly podrobeny analýze ve variantách tlaku 200 a 1000 Pa v komoře vzorku za pomoci CAD programu SolidWorks a jeho nadstavby Cosmos FloWorks.

U analýz pro tlak 200 Pa bylo zjištěno, že nedošlo k již zmíněnému kritickému proudění, a proto nedošlo ke snížení tlaku v dráze primárního svazku elektronů, z toho důvodu nebylo možné jednoznačně určit nejvýhodnější tvar (viz Obr. 6.2 v kapitole 6).

U hodnot tlaku 1000 Pa již došlo k převýšení rychlosti zvuku plynného média. Podle Obr. 6.2 v kapitole 6, který zobrazuje průměrný tlak ve sledované oblasti, je možné určit dva nejvýhodnější tvary. Jedná se o tvary „Low-cone“ a „Short“ (Obr. 6.1B, F v kapitole 6). Důvodem výhodnosti těchto tvarů je dosažení kritického proudění ve velmi krátkém čase a následné rychlé odčerpání plynu. Tím se sníží průměrný tlak v oblasti průchodu primárního elektronového svazku. Díky nižšímu průměrnému tlaku se zabrání srážkám elektronů s molekulami plynu, které jsou nežádoucí a tím rozptylu primárního svazků elektronů.

Podrobné výsledky měření jsou Příloze 1 a Příloze 2. V Příloze 1 jsou kromě zmíněných závislostí tlaku zobrazeny hodnoty rychlosti média, hustoty průtoku, teploty média a Machova čísla v pozorované oblasti průchodu primárního elektronového svazku. Výsledky v uvedených přílohách jsou v tištěné podobě jen pro vybrané tvary „Low-cone“ a „Short“. Tyto hodnoty jsou doplněny přehlednými grafy. V Příloze 2 jsou pro přehlednější orientaci zobrazeny průběhy tlaku na clonkách diferencially čerpané komory. Hodnoty ostatních tvarů jsou přiloženy v elektronické podobě na DVD v Příloze 3.

Podle uvedených analýz lze všeobecně určit nejvýhodnější tvar pro snížení rozptylu primárního elektronového paprsku. Jedná se o tvar zajišťující dosažení kritického proudění v co nejkratším čase a následné co nejrychlejší odčerpání plynu. Proto obecně platí, že ideální tvar má být co nejkratší a nejširší.

Nejmodernější zobrazovací trendy jsou Real 3D obrazy a videa. Za pomoci speciálních brýlí je možno prohlížet objekty v prostoru. Na Obr 6.4 a 6.5 je možné vidět takto prostorově vyobrazené dva obrazy tvarů clonek, které byly vyhodnoceny jako nejvýhodnější, tedy „Short“ a Low-cone“.

## 8 Bibliografie

- [1]. Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura. [Online] [Citace: 2. 5 2011.] <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>.
- [2]. FYZIKÁLNÍ PODSTATA ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPIE. [Online] [Citace: 16. 3 2010.] <http://web.natur.cuni.cz/~parazit/parpages/mikroskopickatechnika/elektronova.htm>.
- [3]. **J., Maxa.** *Analýza proudění plynů v zařízeních elektronového mikroskopu*. Brno : Vysoké učení technické, 2008.
- [4]. **Nebesářová, Jana.** ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE PRO BIOLOGY. [Online] [Citace: 19. 3 2010.] <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.0.html>.
- [5]. **P., Čudek.** *Elektronová mikroskopie*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2007.
- [6]. **J., Boušek.** *Vakuová technika*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005. ISBN: MEL 502.
- [7]. **P., FLEISCHNER.** *Mechanika tekutin*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1984.
- [8]. **J., Maxa.** *Třírozměrné modelování a simulace*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [9]. **V., NEDĚLA.** Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie. *Československý časopis pro fyziku*. 2005, (3).
- [10]. **M., KOZUBKOVÁ.** *Numerické modelování proudění*. Ostrava : VŠBTU, 2003.
- [11]. **S., Drábová.** *Mechanika tekutin*. Ostrava : VŠB-TU, 2007.
- [12]. HYDRODYNAMIKA. [Online] [Citace: 15. 8 2010.] <http://radek.jandora.sweb.cz/f06.htm>.
- [13]. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ. [Online] [Citace: 18. 4 2011.] [http://knc.czu.cz/~vachm/ovzdusi/NS\\_fluid.doc](http://knc.czu.cz/~vachm/ovzdusi/NS_fluid.doc).
- [14]. Simulace - 2.díl. [Online] [Citace: 24. 3 2011.] <http://programujte.com/?akce=clanek&cl=2005111102-simulace-2-dil>.
- [15]. **G., ABRAMOVIČ.** *Aplikovaná dynamika plynů*. Praha : Technicko vědecké vydavatelství, 1952.
- [16]. DISKRETIZACE REYNOLDS ROVNIC, METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ, TRANSFORMACE SOUŘADNIC. [Online] [Citace: 18. 4 2011.] [http://knc.czu.cz/~vachm/fluid/NS\\_diskr.doc](http://knc.czu.cz/~vachm/fluid/NS_diskr.doc).
- [17]. **R., Kožíň.** *Modelování proudění vody na měrném přelivu*. Praha : ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE, 2009.

- [18]. **J., Ježek.** *Mechanika tekutin*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2000.
- [19]. [www.solidvision.cz](http://www.solidvision.cz). [Online]
- [20]. [www.feicompany.com](http://www.feicompany.com). [Online]
- [21]. TRANSMISTÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP. [Online] [Citace: 7. 12 2009.] <http://www.marenky.skladik.com/patologie/Mikroskopy.doc>.
- [22]. TERMOMECHANIKA. [Online] [Citace: 28. 11 2010.] [http://www.sps-ko.cz/documents/MEC\\_kratochvil/TERMOMECHANIKA\\_INTERNET\\_DOC/](http://www.sps-ko.cz/documents/MEC_kratochvil/TERMOMECHANIKA_INTERNET_DOC/).
- [23]. SRÁŽKY MOLEKUL, STŘEDNÍ VOLNÁ DRÁHA. [Online] [Citace: 21. 3 2010.] [http://web.natur.cuni.cz/~zuskova/ktp\\_2\\_so.pdf](http://web.natur.cuni.cz/~zuskova/ktp_2_so.pdf).
- [24]. RASTROVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP JAKO PROSTŘEDEK MODERNÍ VÝUKY. [Online] [Citace: 7. 12 2009.] <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/rem>.
- [25]. MECHANIKA TEKUTIN. [Online] [Citace: 21. 2 2011.] <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/MT/>.
- [26]. ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE A MIKROANALÝZA. [Online] [Citace: 7. 12 2009.] [http://www.sci.muni.cz/~sulovsky/Vyuka/Lab\\_metody/Elektronova%20mikroskopie.pdf](http://www.sci.muni.cz/~sulovsky/Vyuka/Lab_metody/Elektronova%20mikroskopie.pdf).
- [27]. ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE. [Online] [Citace: 26. 3 2010.] [http://home.pf.jcu.cz/~bilyto00/bak/1\\_1.htm](http://home.pf.jcu.cz/~bilyto00/bak/1_1.htm).
- [28]. ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE. [Online] [Citace: 7. 12 2009.] <http://home.pf.jcu.cz/~bilyto00/bak/>.
- [29]. ALPIKOVANÁ FYZIKA. [Online] [Citace: 8. 17 2009.] [http://www.avcr.cz/anotace\\_txt.php?ID=50#11](http://www.avcr.cz/anotace_txt.php?ID=50#11).
- [30]. [www.3djournal.com/002/3D\\_photos\\_3D\\_images.php](http://www.3djournal.com/002/3D_photos_3D_images.php). [Online]
- [31]. [www.zoner.com](http://www.zoner.com). [Online]

## 9 Seznam použitých veličin a převod vybraných hodnot

$c$	( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	rychlost zvuku
$d$	(m)	průměr potrubí
$e$	(J)	vnitřní energie
$ij$	-	indexy u veličin udávají sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace).
$K$	(J)	kinetická energie
$l$	(m)	délkové měřítko
$M$	-	Machovo číslo
$p$	Pa	statický tlak
$QH$	( $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ )	přívod či odvod tepla vztažený na jednotku objemu
$q_i$	( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ )	tok tepla difusní
$R$	-	všeobecná plynová konstanta
$Re$	-	Reynoldsovo číslo
$T$	K	teplota plynu
$T_t$	(s)	časové měřítko přenosu turbulentních vírů
$T_v$	(s)	časové měřítko molekulární difúze
$u$	( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	rychlostní měřítko
$v, u$	( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	rychlost tekutiny
$v_s$	( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	střední rychlost v potrubí
$x_k$	(m)	vzdálenost od náběžné hrany ve které laminární mezní vrstva přechází do turbulentní
$\kappa$	-	Poissonova konstanta
$\mu t$	(Pa.s)	turbulentní viskozita
$\rho$	( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	hustota plynu
$\varepsilon$	( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ )	rychlost disipace (pro jednotku hmotnosti)
$\eta$	(m)	Kolmogorovovo měřítko
$\nu$	( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	kinematická viskozita

1 Mach	1 137 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (316 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1 Kelvin	-272,15 °C
1 Torr	133,3 Pa



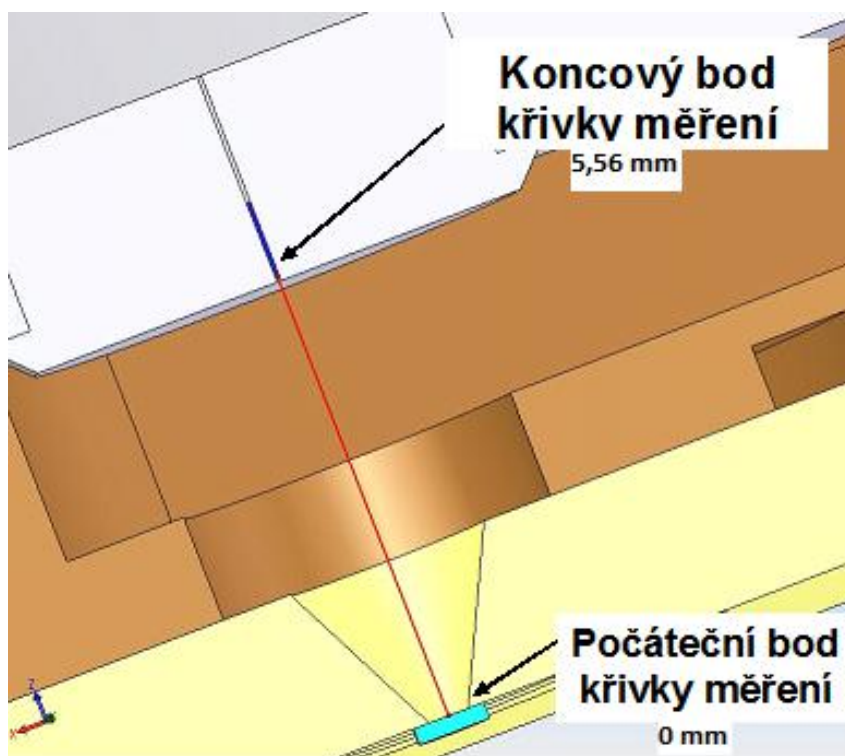
## 10 Příloha 1

V první řadě můžeme sledovat průběh tlaků v diferenciálně čerpané komoře – především v místě primárního svazku – v tabulkovém a grafickém výstupu.

Jak bylo uvedeno, systém umožňuje vytvořit křivku – v tomto případě přímku – ve sledované oblasti a následně vyčíst a vynést do grafu požadované hodnoty. Hlavním parametrem je závislost průběhu statického tlaku a hustoty plynu podél načrtnuté křivky, dále rychlost proudění plynu, teplota a Machovo číslo. Pro úplnost je třeba připomenout, že křivka byla tvořena směrem od otvoru mezi diferenciálně čerpanou komorou a komorou vzorku směrem k tubusu (Obr. 10.1). To znamená, že hodnota délky nula začíná u komory vzorku a zvyšující hodnota směřuje k tubusu.

Ve všech grafech se zobrazují zavidlosti, kde na ose X je vždy vynesena délka křivky zobrazující dráhu průchodu primárního svazku elektronů diferenciálně čerpanou komorou a na ose Y sledovaný parametr (hustota, Machovo číslo, teplota, rychlost proudění a tlak)

Výsledky těchto měření systém vynáší do tabulkové podoby.



Obr. 10.1: Dráha průchodu primárního elektronového svazku

## 10.1 1000 Pa Short

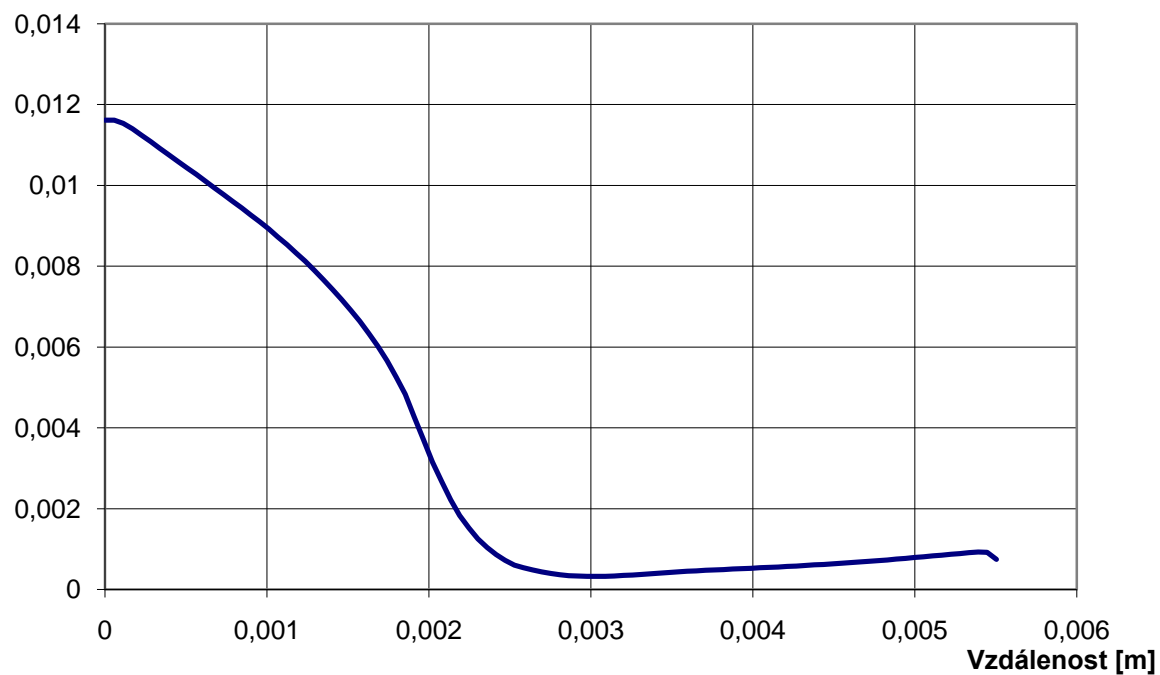
### 10.1.1 Tabulkový výstup

Vzdálenost [m]	Tlak [Pa]	Teplota [K]	Rychlost média [m/s]	Mach [-]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
0,00E+00	969,45	290,80	81,70	0,24	1,16E-02
5,62E-05	973,66	291,95	92,12	0,27	1,16E-02
1,12E-04	965,87	291,56	96,70	0,28	1,15E-02
1,68E-04	952,44	290,95	103,16	0,30	1,14E-02
2,25E-04	936,79	290,26	110,34	0,32	1,12E-02
2,81E-04	921,60	289,73	116,56	0,34	1,11E-02
3,37E-04	906,82	289,33	121,92	0,36	1,09E-02
3,93E-04	892,22	288,96	127,06	0,37	1,08E-02
4,49E-04	877,98	288,63	131,80	0,39	1,06E-02
5,05E-04	863,72	288,31	136,44	0,40	1,04E-02
5,62E-04	849,40	288,01	140,52	0,41	1,03E-02
6,18E-04	835,07	287,72	144,60	0,43	1,01E-02
6,74E-04	820,61	287,44	148,11	0,44	9,94E-03
7,30E-04	806,14	287,16	151,59	0,45	9,78E-03
7,86E-04	791,61	286,89	154,78	0,46	9,61E-03
8,42E-04	777,05	286,62	157,87	0,47	9,44E-03
8,99E-04	762,30	286,35	160,67	0,47	9,27E-03
9,55E-04	747,40	286,07	163,28	0,48	9,10E-03
1,01E-03	731,72	285,74	166,23	0,49	8,92E-03
1,07E-03	714,81	285,32	169,74	0,50	8,73E-03
1,12E-03	697,73	284,87	173,41	0,51	8,53E-03
1,18E-03	679,98	284,30	177,70	0,53	8,33E-03
1,24E-03	662,20	283,72	182,00	0,54	8,13E-03
1,29E-03	641,41	282,82	187,08	0,56	7,90E-03
1,35E-03	620,61	281,92	192,16	0,57	7,67E-03
1,40E-03	598,67	280,84	198,79	0,59	7,42E-03
1,46E-03	576,47	279,73	205,77	0,61	7,18E-03
1,52E-03	552,57	278,36	213,87	0,64	6,91E-03
1,57E-03	527,68	276,85	222,64	0,67	6,64E-03
1,63E-03	500,63	274,91	232,68	0,70	6,34E-03
1,68E-03	470,84	272,45	244,33	0,74	6,01E-03
1,74E-03	438,92	269,43	257,53	0,78	5,67E-03
1,80E-03	400,63	264,75	275,36	0,85	5,25E-03
1,85E-03	361,49	259,72	293,96	0,91	4,83E-03
1,91E-03	309,24	249,39	324,49	1,03	4,27E-03
1,97E-03	256,99	239,07	355,02	1,15	3,71E-03
2,02E-03	207,42	226,28	389,99	1,30	3,16E-03
2,08E-03	165,47	213,39	430,56	1,48	2,67E-03
2,13E-03	129,52	201,81	465,95	1,64	2,22E-03
2,19E-03	101,75	192,15	491,26	1,77	1,84E-03
2,25E-03	81,18	185,08	509,69	1,87	1,52E-03
2,30E-03	65,46	181,35	523,47	1,95	1,26E-03
2,36E-03	54,00	181,52	531,28	1,97	1,04E-03
2,41E-03	45,82	185,79	533,20	1,96	8,62E-04
2,47E-03	39,93	193,73	528,78	1,90	7,22E-04
2,53E-03	35,42	204,48	516,88	1,82	6,07E-04
2,58E-03	33,14	213,34	510,35	1,75	5,43E-04
2,64E-03	31,04	223,40	498,03	1,67	4,85E-04

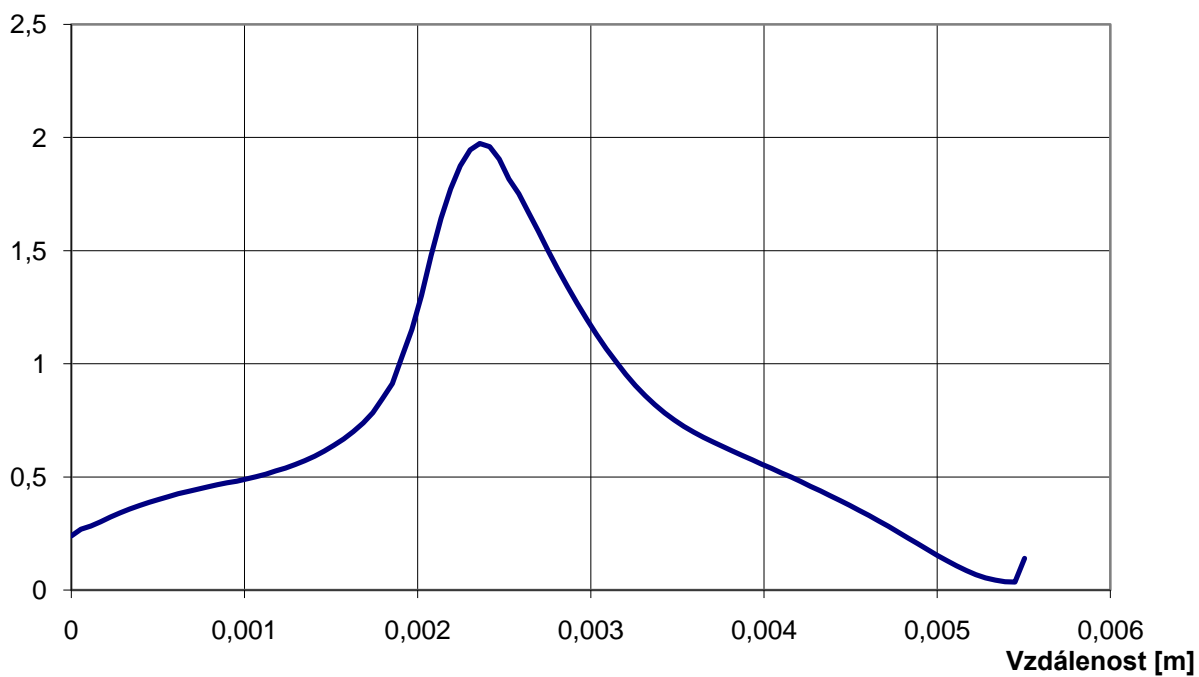
2,70E-03	28,99	232,74	483,00	1,59	4,35E-04
2,75E-03	27,32	240,85	465,53	1,50	3,96E-04
2,81E-03	26,00	247,43	446,44	1,42	3,66E-04
2,86E-03	25,02	252,35	426,28	1,34	3,45E-04
2,92E-03	24,39	255,65	405,43	1,27	3,32E-04
2,98E-03	24,11	257,47	384,30	1,20	3,26E-04
3,03E-03	24,15	258,09	363,38	1,13	3,26E-04
3,09E-03	24,43	257,84	343,15	1,07	3,30E-04
3,15E-03	24,88	256,91	323,85	1,01	3,37E-04
3,20E-03	25,51	255,37	305,58	0,95	3,48E-04
3,26E-03	26,28	253,32	288,57	0,90	3,61E-04
3,31E-03	27,11	250,93	272,90	0,86	3,76E-04
3,37E-03	27,96	248,30	258,66	0,82	3,92E-04
3,43E-03	28,79	245,48	245,85	0,78	4,09E-04
3,48E-03	29,54	242,56	234,43	0,75	4,24E-04
3,54E-03	30,20	239,59	224,25	0,72	4,39E-04
3,59E-03	30,74	236,62	215,11	0,70	4,53E-04
3,65E-03	31,18	233,68	206,78	0,67	4,65E-04
3,71E-03	31,54	230,76	199,03	0,65	4,76E-04
3,76E-03	31,83	227,88	191,69	0,63	4,87E-04
3,82E-03	32,09	225,01	184,61	0,61	4,97E-04
3,88E-03	32,33	222,17	177,71	0,59	5,07E-04
3,93E-03	32,55	219,34	170,92	0,58	5,17E-04
3,99E-03	32,78	216,52	164,21	0,56	5,27E-04
4,04E-03	33,00	213,70	157,54	0,54	5,38E-04
4,10E-03	33,22	210,88	150,89	0,52	5,49E-04
4,16E-03	33,45	208,04	144,24	0,50	5,60E-04
4,21E-03	33,67	205,19	137,59	0,48	5,72E-04
4,27E-03	33,90	202,31	130,91	0,46	5,84E-04
4,32E-03	34,13	199,42	124,20	0,44	5,96E-04
4,38E-03	34,37	196,50	117,44	0,42	6,09E-04
4,44E-03	34,60	193,55	110,62	0,40	6,23E-04
4,49E-03	34,83	190,56	103,72	0,37	6,37E-04
4,55E-03	35,07	187,55	96,74	0,35	6,51E-04
4,61E-03	35,30	184,50	89,67	0,33	6,67E-04
4,66E-03	35,52	181,42	82,51	0,31	6,82E-04
4,72E-03	35,75	178,31	75,28	0,28	6,99E-04
4,77E-03	35,98	175,17	68,00	0,26	7,16E-04
4,83E-03	36,20	172,00	60,70	0,23	7,33E-04
4,89E-03	36,42	168,82	53,45	0,21	7,52E-04
4,94E-03	36,63	165,63	46,32	0,18	7,71E-04
5,00E-03	36,84	162,46	39,39	0,15	7,90E-04
5,05E-03	37,05	159,33	32,80	0,13	8,10E-04
5,11E-03	37,24	156,26	26,69	0,11	8,30E-04
5,17E-03	37,43	153,29	21,23	0,09	8,51E-04
5,22E-03	37,61	150,42	16,61	0,07	8,71E-04
5,28E-03	37,81	147,60	12,97	0,05	8,92E-04
5,34E-03	38,03	145,10	10,46	0,04	9,13E-04
5,39E-03	38,10	143,48	8,89	0,04	9,25E-04
5,45E-03	37,84	143,13	8,49	0,04	9,21E-04
5,50E-03	31,72	149,62	34,42	0,14	7,44E-04
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>283,07</b>	<b>233,18</b>	<b>215,00</b>	<b>0,70</b>	<b>3,61E-03</b>

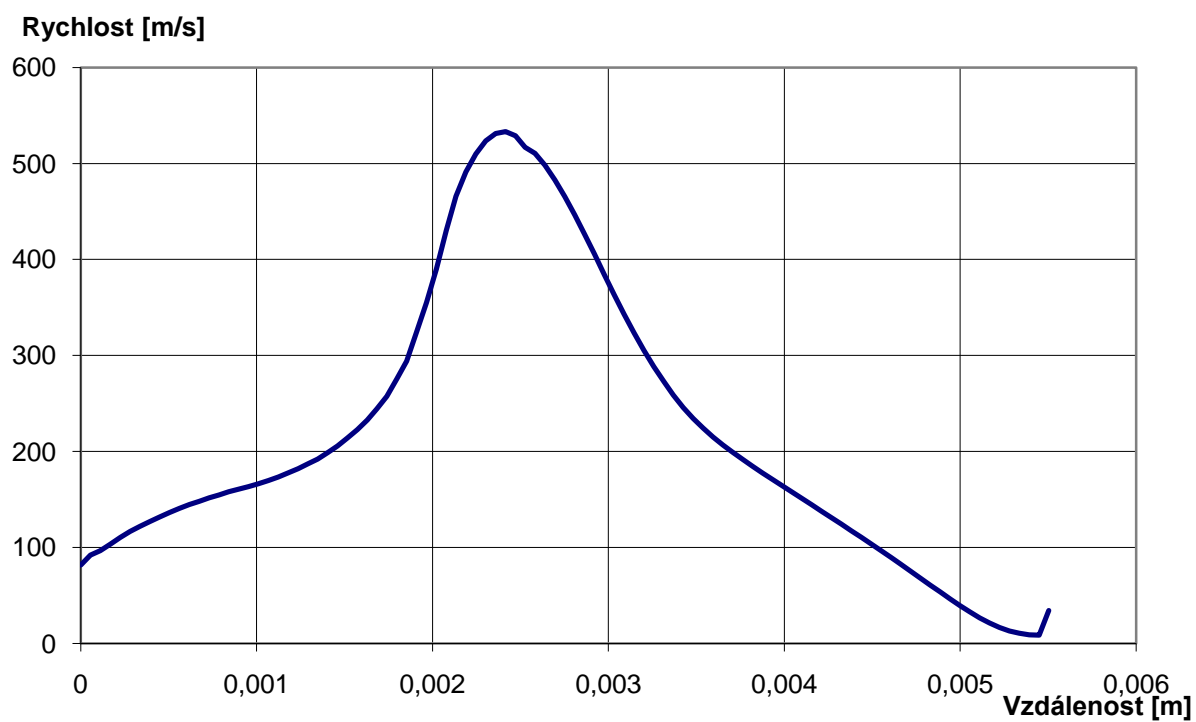
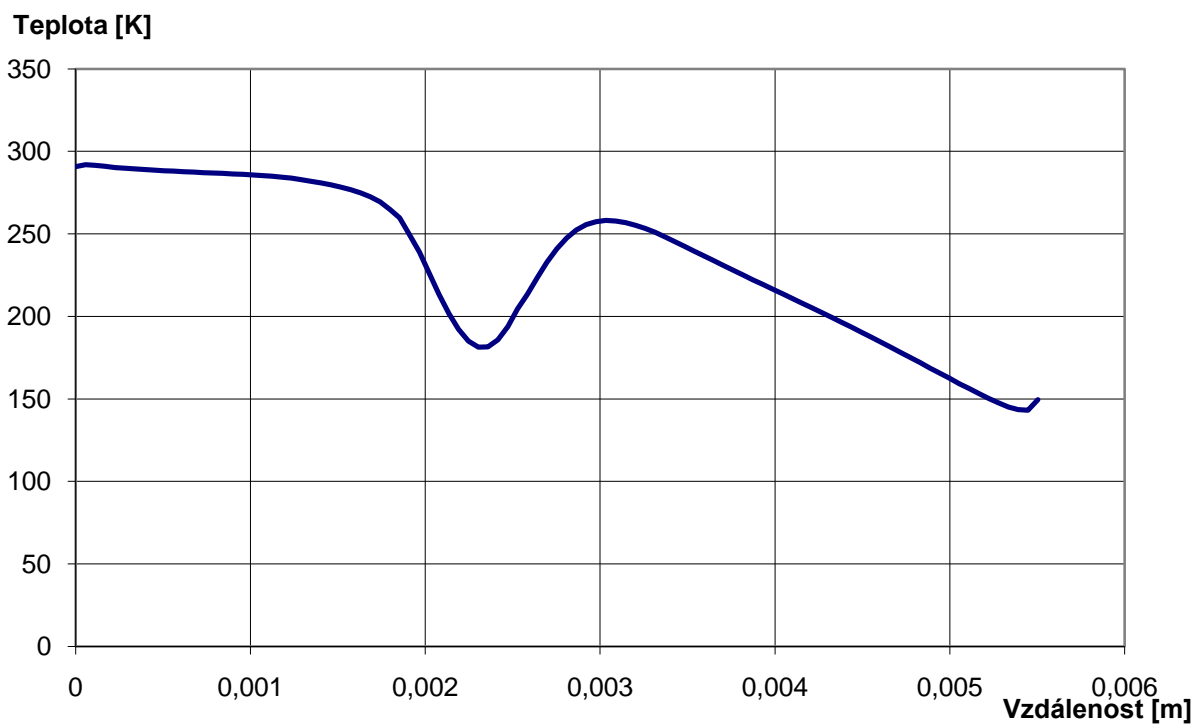
### 10.1.2 Grafický výstup

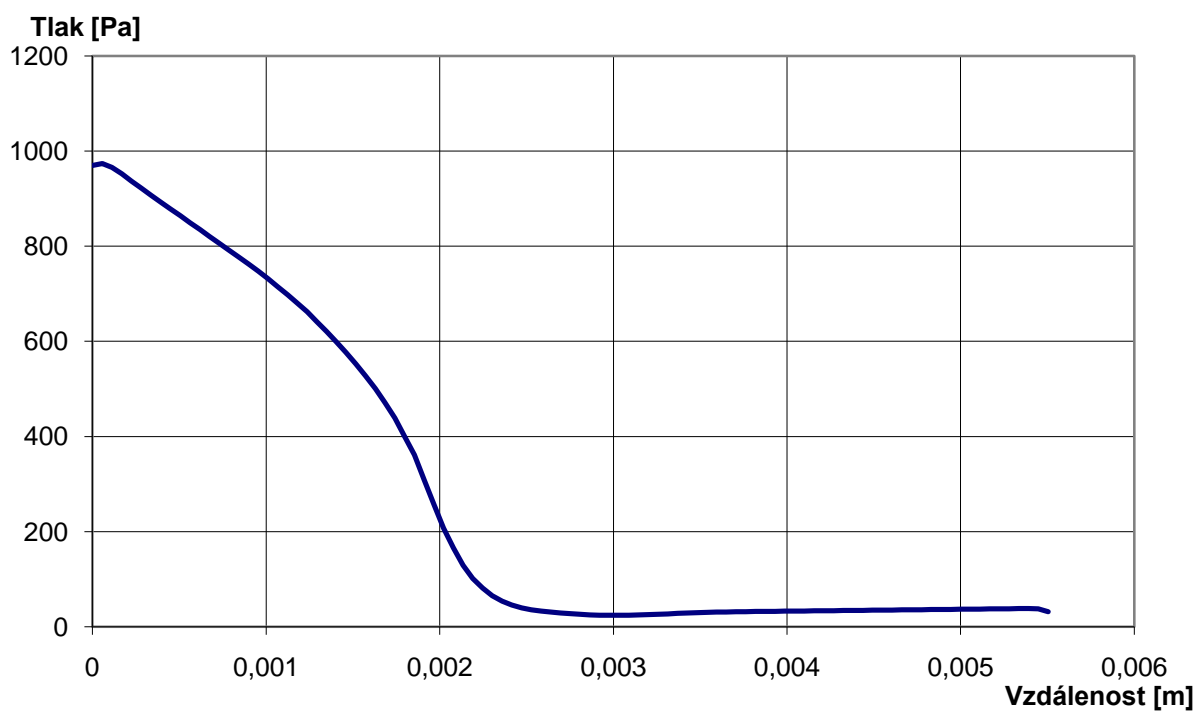
Hustota [kg/m<sup>3</sup>]



Machovo číslo [-]







## 10.2 1000 Pa Low-cone

### 10.2.1 Tabulkový výstup

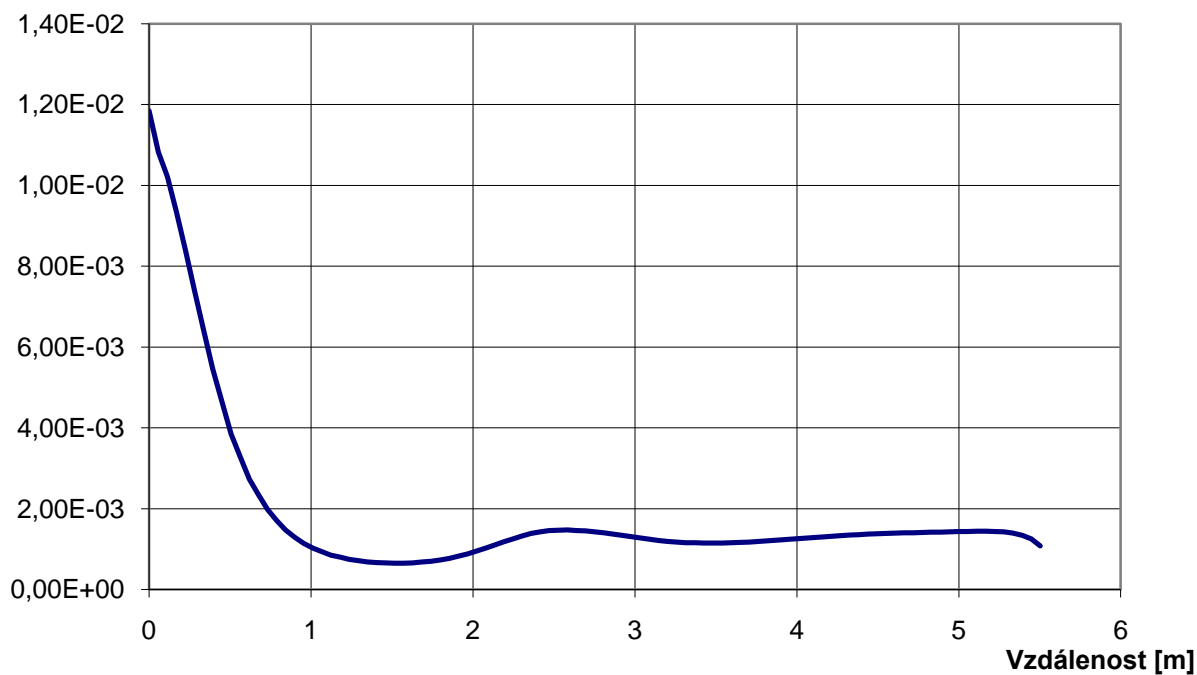
Vzdálenost [m]	Tlak [Pa]	Teplota [K]	Rychlost média [m/s]	Mach [-]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
0,00E+00	1017,73	294,47	604,39	1,76	1,18E-02
5,62E-05	929,85	286,68	616,90	1,82	1,08E-02
1,12E-04	878,07	282,07	624,31	1,86	1,02E-02
1,68E-04	803,81	274,68	635,53	1,92	9,35E-03
2,25E-04	720,41	266,19	648,27	1,99	8,38E-03
2,81E-04	635,61	256,32	662,86	2,07	7,40E-03
3,37E-04	549,55	245,23	679,09	2,18	6,39E-03
3,93E-04	468,77	234,08	695,31	2,28	5,45E-03
4,49E-04	398,33	222,83	711,49	2,39	4,63E-03
5,05E-04	331,22	211,85	727,19	2,51	3,85E-03
5,62E-04	283,23	202,36	740,15	2,61	3,30E-03
6,18E-04	235,25	192,88	753,12	2,72	2,74E-03
6,74E-04	202,53	184,87	763,97	2,82	2,36E-03
7,30E-04	170,46	176,92	774,74	2,92	1,98E-03
7,86E-04	147,38	170,40	783,73	3,01	1,71E-03
8,42E-04	127,01	164,30	792,18	3,10	1,48E-03
8,99E-04	111,13	159,40	799,24	3,17	1,29E-03
9,55E-04	98,52	155,37	805,28	3,23	1,15E-03
1,01E-03	87,85	152,01	810,43	3,29	1,02E-03
1,07E-03	80,24	149,70	814,18	3,33	9,34E-04
1,12E-03	73,24	147,72	817,64	3,37	8,52E-04
1,18E-03	68,71	147,02	819,94	3,38	8,00E-04
1,24E-03	64,21	146,34	822,24	3,40	7,47E-04
1,29E-03	61,59	146,70	823,24	3,40	7,17E-04
1,35E-03	58,96	147,06	824,27	3,40	6,86E-04
1,40E-03	57,56	148,96	824,53	3,38	6,70E-04
1,46E-03	56,43	151,19	824,65	3,35	6,57E-04
1,52E-03	56,10	154,49	823,44	3,31	6,53E-04
1,57E-03	56,24	158,41	821,45	3,26	6,54E-04
1,63E-03	56,96	162,89	818,52	3,21	6,63E-04
1,68E-03	58,39	168,09	814,39	3,14	6,79E-04
1,74E-03	60,19	173,91	809,86	3,07	7,00E-04
1,80E-03	63,13	181,58	804,15	2,99	7,35E-04
1,85E-03	66,17	189,38	798,29	2,90	7,70E-04
1,91E-03	70,89	199,31	790,14	2,80	8,25E-04
1,97E-03	75,60	209,25	782,00	2,71	8,80E-04
2,02E-03	81,61	220,56	772,30	2,61	9,50E-04
2,08E-03	87,80	232,07	762,36	2,51	1,02E-03
2,13E-03	94,50	243,82	752,19	2,41	1,10E-03
2,19E-03	101,45	255,66	741,91	2,32	1,18E-03
2,25E-03	107,93	267,22	732,48	2,24	1,26E-03
2,30E-03	113,90	278,49	723,93	2,17	1,33E-03
2,36E-03	119,08	289,09	716,31	2,11	1,39E-03
2,41E-03	122,42	298,18	710,82	2,06	1,42E-03
2,47E-03	125,45	306,94	705,64	2,01	1,46E-03
2,53E-03	126,07	313,09	702,57	1,98	1,47E-03
2,58E-03	126,70	319,25	699,53	1,96	1,47E-03
2,64E-03	125,71	324,24	697,57	1,94	1,46E-03

2,70E-03	124,58	329,13	695,72	1,92	1,45E-03
2,75E-03	122,74	334,03	694,62	1,90	1,43E-03
2,81E-03	120,63	338,94	693,81	1,88	1,40E-03
2,86E-03	118,20	344,02	693,27	1,87	1,38E-03
2,92E-03	115,50	349,23	692,94	1,85	1,34E-03
2,98E-03	112,69	354,78	692,58	1,84	1,31E-03
3,03E-03	109,66	360,95	692,15	1,82	1,28E-03
3,09E-03	106,76	367,43	691,49	1,80	1,24E-03
3,15E-03	104,52	375,50	689,63	1,78	1,22E-03
3,20E-03	102,28	383,58	687,77	1,76	1,19E-03
3,26E-03	101,02	394,22	684,33	1,72	1,18E-03
3,31E-03	99,78	404,93	680,86	1,69	1,16E-03
3,37E-03	99,22	417,48	675,79	1,65	1,15E-03
3,43E-03	98,84	430,55	670,28	1,62	1,15E-03
3,48E-03	98,87	445,13	663,59	1,57	1,15E-03
3,54E-03	99,16	460,75	656,09	1,53	1,15E-03
3,59E-03	99,64	476,82	647,45	1,48	1,16E-03
3,65E-03	100,38	493,57	637,11	1,43	1,17E-03
3,71E-03	101,23	510,49	626,19	1,39	1,18E-03
3,76E-03	102,48	528,01	613,02	1,33	1,19E-03
3,82E-03	103,72	545,57	599,83	1,28	1,21E-03
3,88E-03	105,08	564,61	585,09	1,23	1,22E-03
3,93E-03	106,44	583,65	570,38	1,18	1,24E-03
3,99E-03	107,87	603,32	554,18	1,13	1,26E-03
4,04E-03	109,32	623,11	537,70	1,08	1,27E-03
4,10E-03	110,70	643,36	520,45	1,03	1,29E-03
4,16E-03	112,04	663,85	502,80	0,98	1,30E-03
4,21E-03	113,32	684,48	484,66	0,93	1,32E-03
4,27E-03	114,53	705,28	465,94	0,88	1,33E-03
4,32E-03	115,67	726,11	447,01	0,83	1,35E-03
4,38E-03	116,64	747,01	427,47	0,78	1,36E-03
4,44E-03	117,60	767,91	407,90	0,74	1,37E-03
4,49E-03	118,36	788,70	387,68	0,69	1,38E-03
4,55E-03	119,13	809,49	367,49	0,65	1,39E-03
4,61E-03	119,77	829,84	346,75	0,60	1,39E-03
4,66E-03	120,39	850,14	325,99	0,56	1,40E-03
4,72E-03	120,93	869,68	304,89	0,52	1,41E-03
4,77E-03	121,44	888,91	283,68	0,48	1,41E-03
4,83E-03	121,91	907,29	262,38	0,44	1,42E-03
4,89E-03	122,34	924,85	241,01	0,40	1,42E-03
4,94E-03	122,76	941,70	219,76	0,36	1,43E-03
5,00E-03	123,15	957,08	198,69	0,32	1,43E-03
5,05E-03	123,54	972,13	177,87	0,29	1,44E-03
5,11E-03	123,89	985,08	157,88	0,25	1,44E-03
5,17E-03	124,24	998,04	138,14	0,22	1,45E-03
5,22E-03	123,43	1009,16	120,21	0,19	1,44E-03
5,28E-03	122,39	1020,40	103,13	0,16	1,42E-03
5,34E-03	120,28	1030,02	88,04	0,14	1,40E-03
5,39E-03	115,49	1038,97	74,45	0,12	1,34E-03
5,45E-03	108,04	1048,33	62,70	0,10	1,26E-03
5,50E-03	92,70	1067,51	74,77	0,12	1,08E-03
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>165,14</b>	<b>446,05</b>	<b>602,99</b>	<b>1,83</b>	<b>1,92E-03</b>

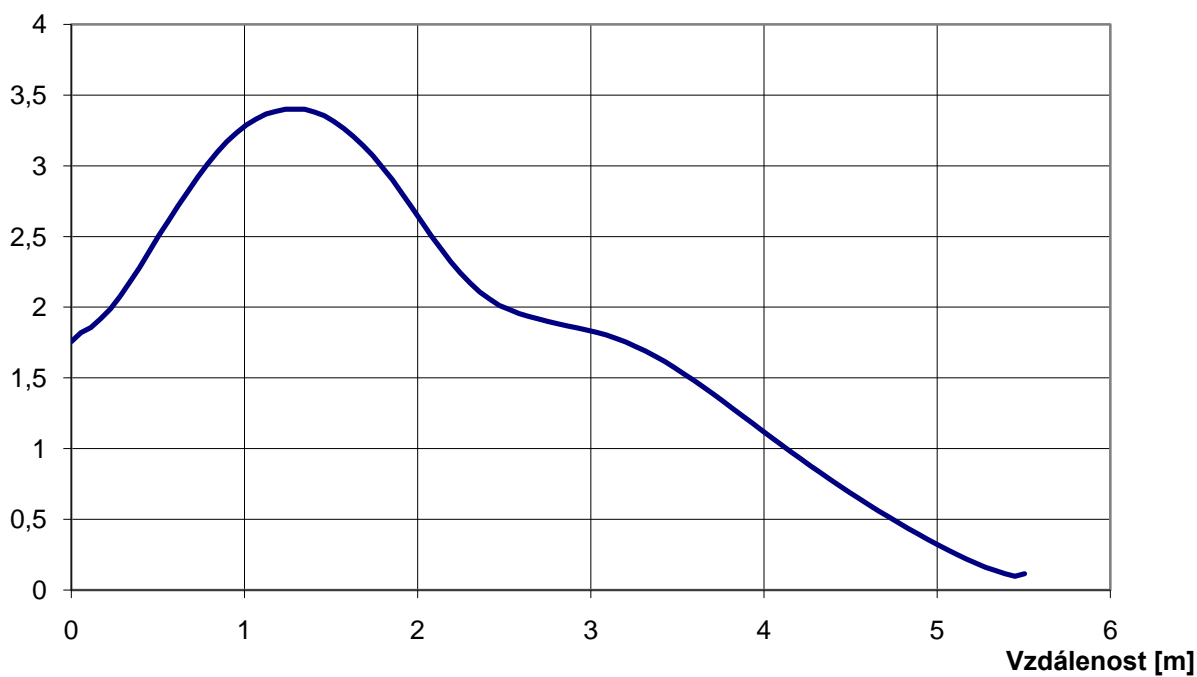


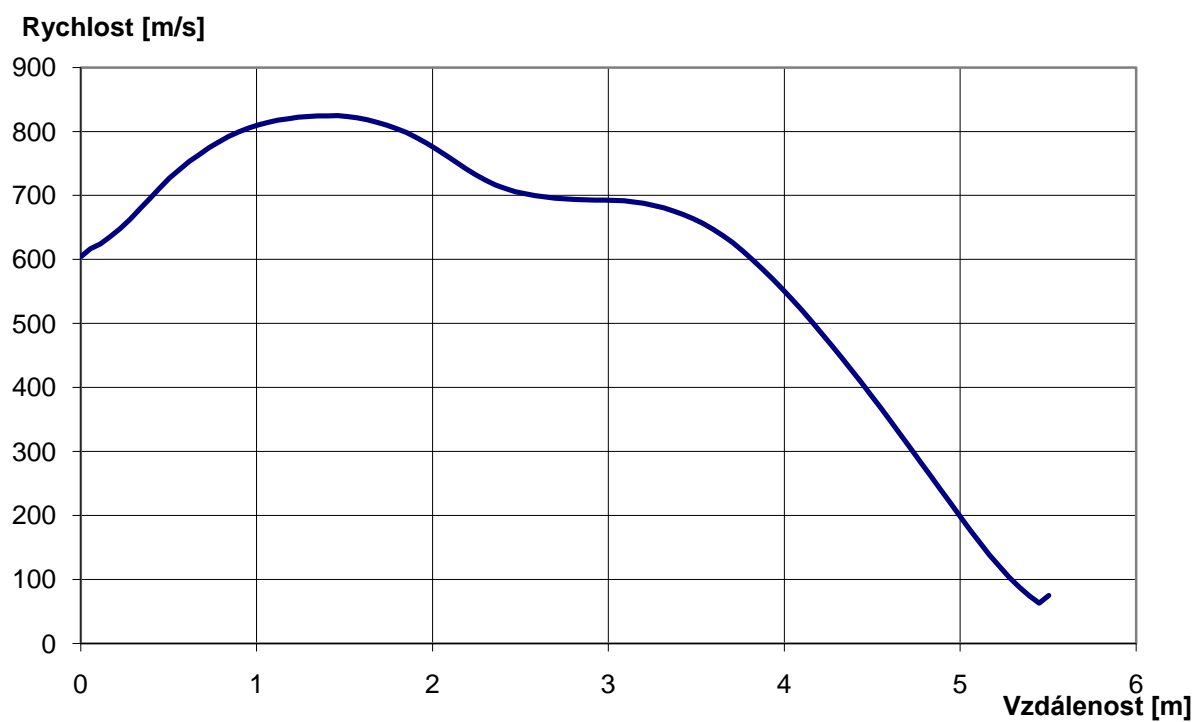
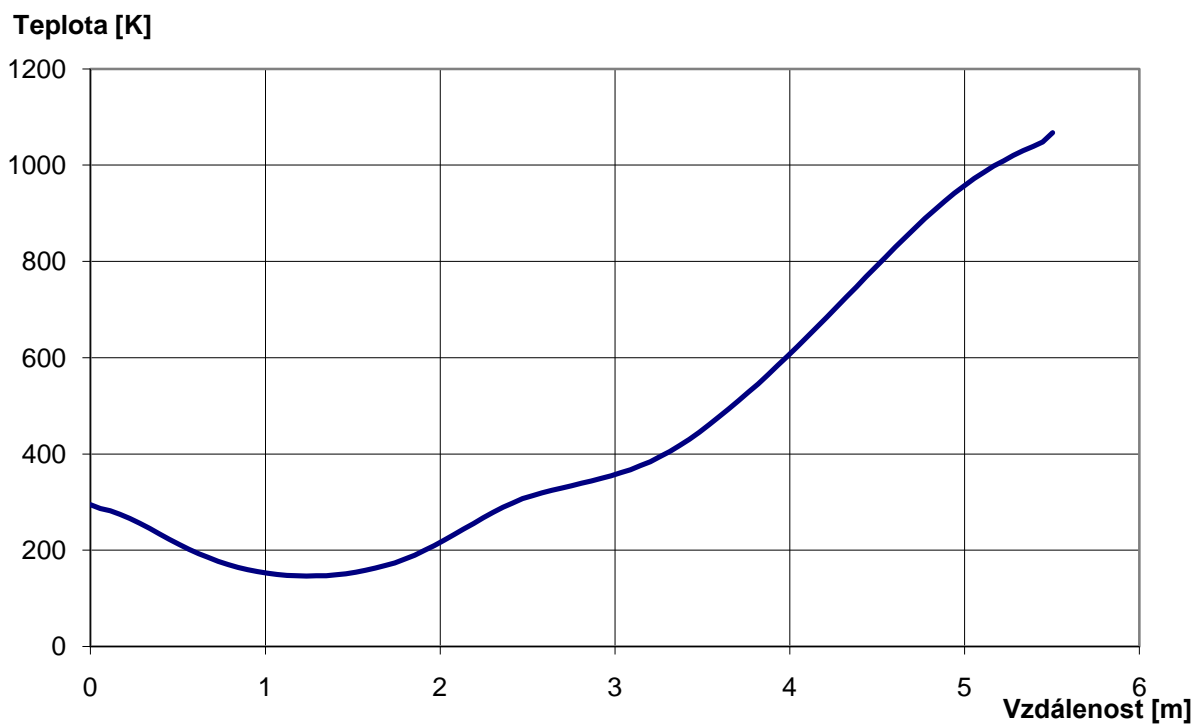
## 10.2.2 Grafický výstup

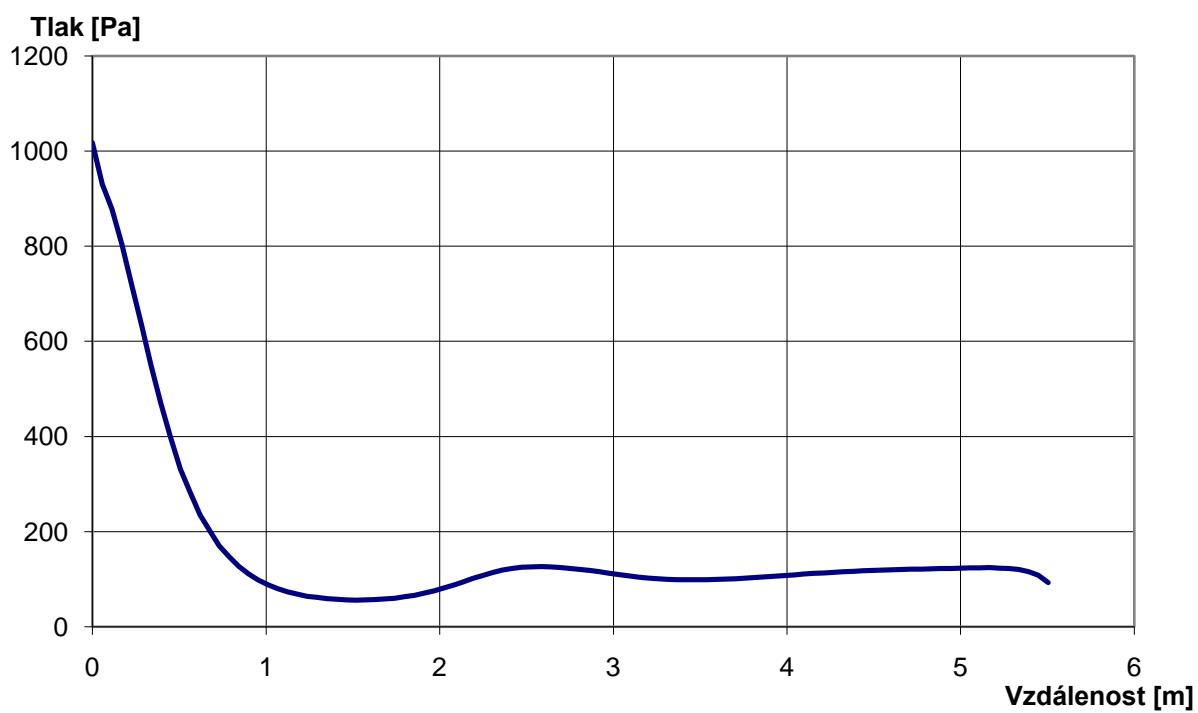
Hustota [kg/m<sup>3</sup>]



Machovo číslo [-]







## 10.3 200 Pa Short

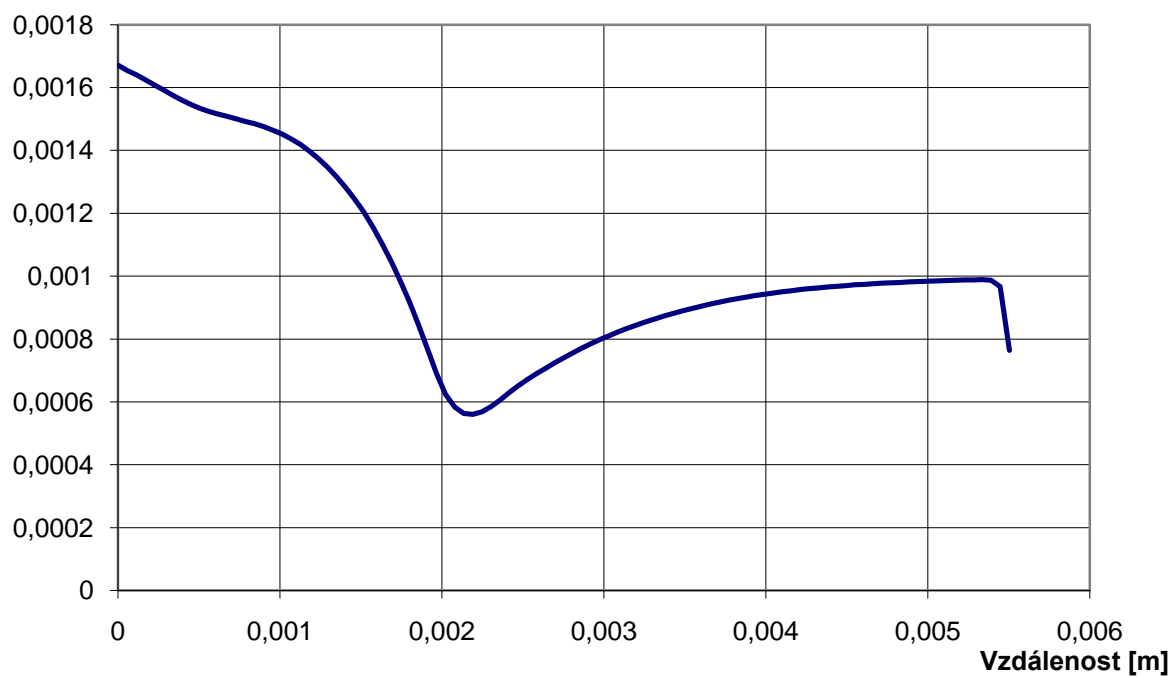
### 10.3.1 Tabulkový výstup

Vzdálenost [m]	Tlak [Pa]	Teplota [K]	Rychlost média [m/s]	Mach [-]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
0,00E+00	200,00	416,78	10,35	0,03	1,67E-03
5,62E-05	198,02	417,10	9,18	0,02	1,65E-03
1,12E-04	196,98	418,27	8,55	0,02	1,64E-03
1,68E-04	195,87	419,87	7,88	0,02	1,62E-03
2,25E-04	194,76	421,77	7,14	0,02	1,61E-03
2,81E-04	193,67	423,84	6,26	0,02	1,59E-03
3,37E-04	192,64	425,97	5,16	0,01	1,58E-03
3,93E-04	191,70	428,06	3,80	0,01	1,56E-03
4,49E-04	190,87	430,01	2,12	0,01	1,55E-03
5,05E-04	190,14	431,72	0,12	0,00	1,53E-03
5,62E-04	189,48	433,10	2,37	0,01	1,52E-03
6,18E-04	188,84	434,04	5,31	0,01	1,52E-03
6,74E-04	188,10	434,46	8,83	0,02	1,51E-03
7,30E-04	187,04	434,35	12,77	0,03	1,50E-03
7,86E-04	185,89	433,81	16,35	0,04	1,49E-03
8,42E-04	184,54	432,90	20,29	0,05	1,48E-03
8,99E-04	182,80	431,48	24,72	0,06	1,48E-03
9,55E-04	180,68	429,61	29,43	0,07	1,46E-03
1,01E-03	178,14	427,28	34,35	0,08	1,45E-03
1,07E-03	175,10	424,42	39,46	0,10	1,44E-03
1,12E-03	171,65	421,16	44,68	0,11	1,42E-03
1,18E-03	167,58	417,30	50,02	0,12	1,40E-03
1,24E-03	163,16	413,12	55,42	0,14	1,38E-03
1,29E-03	158,03	408,31	60,89	0,15	1,35E-03
1,35E-03	152,54	403,21	66,40	0,17	1,32E-03
1,40E-03	146,50	397,61	71,94	0,18	1,28E-03
1,46E-03	140,11	391,67	77,53	0,20	1,25E-03
1,52E-03	133,25	385,26	83,75	0,21	1,20E-03
1,57E-03	125,81	378,52	92,88	0,24	1,16E-03
1,63E-03	117,80	371,14	103,17	0,27	1,10E-03
1,68E-03	109,28	362,75	112,10	0,29	1,05E-03
1,74E-03	100,28	353,40	121,09	0,32	9,87E-04
1,80E-03	90,70	342,88	130,46	0,35	9,20E-04
1,85E-03	80,66	330,92	139,66	0,38	8,48E-04
1,91E-03	70,33	317,23	147,11	0,41	7,71E-04
1,97E-03	59,96	301,72	148,85	0,43	6,90E-04
2,02E-03	51,27	285,28	142,64	0,42	6,24E-04
2,08E-03	45,13	268,83	129,96	0,40	5,84E-04
2,13E-03	41,00	253,04	113,87	0,36	5,64E-04
2,19E-03	38,36	238,50	97,09	0,31	5,60E-04
2,25E-03	36,78	225,52	81,48	0,27	5,69E-04
2,30E-03	35,92	214,08	68,05	0,23	5,85E-04
2,36E-03	35,48	204,00	57,12	0,20	6,06E-04
2,41E-03	35,24	195,20	48,56	0,17	6,29E-04
2,47E-03	35,04	187,56	41,89	0,15	6,51E-04
2,53E-03	34,85	180,91	36,34	0,14	6,72E-04
2,58E-03	34,73	175,46	32,26	0,12	6,90E-04
2,64E-03	34,65	170,89	29,29	0,11	7,07E-04

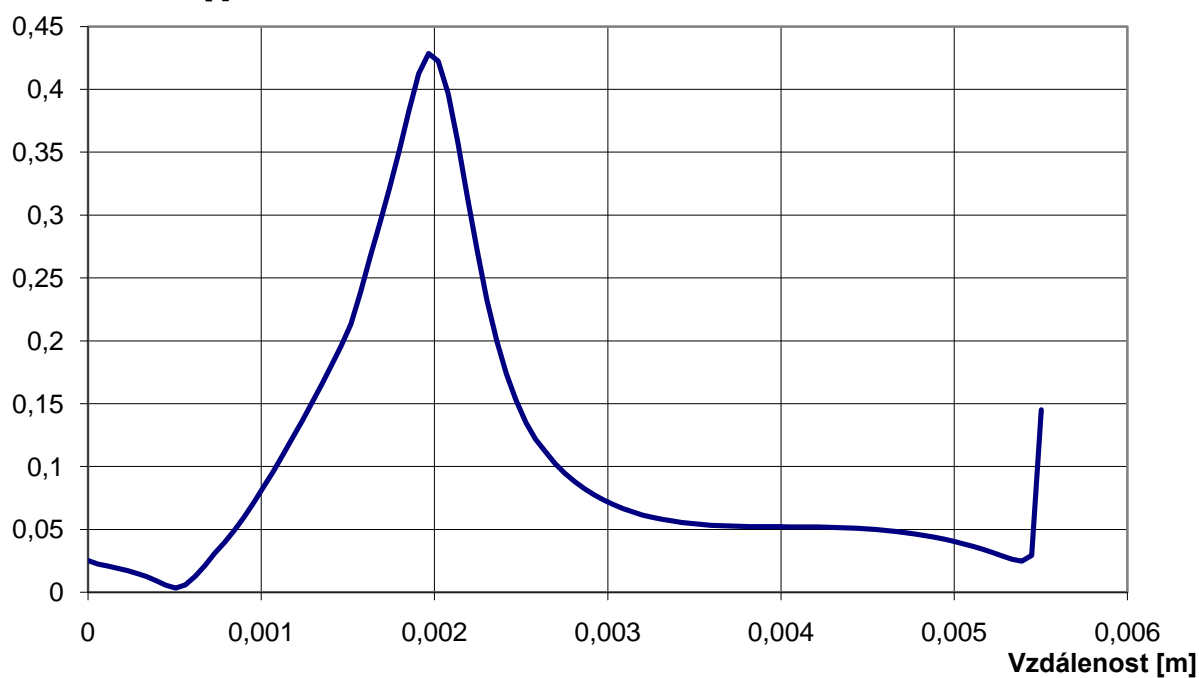
2,70E-03	34,58	166,40	26,42	0,10	7,25E-04
2,75E-03	34,53	162,57	24,22	0,09	7,41E-04
2,81E-03	34,49	158,98	22,26	0,09	7,56E-04
2,86E-03	34,45	155,75	20,61	0,08	7,71E-04
2,92E-03	34,42	152,83	19,23	0,08	7,85E-04
2,98E-03	34,39	150,10	17,98	0,07	7,98E-04
3,03E-03	34,36	147,70	16,99	0,07	8,11E-04
3,09E-03	34,34	145,37	16,05	0,07	8,23E-04
3,15E-03	34,31	143,39	15,33	0,06	8,34E-04
3,20E-03	34,29	141,41	14,64	0,06	8,45E-04
3,26E-03	34,27	139,75	14,13	0,06	8,55E-04
3,31E-03	34,26	138,10	13,64	0,06	8,64E-04
3,37E-03	34,24	136,66	13,26	0,06	8,73E-04
3,43E-03	34,23	135,27	12,93	0,06	8,81E-04
3,48E-03	34,21	134,02	12,66	0,05	8,89E-04
3,54E-03	34,20	132,85	12,44	0,05	8,97E-04
3,59E-03	34,19	131,76	12,26	0,05	9,04E-04
3,65E-03	34,18	130,77	12,12	0,05	9,10E-04
3,71E-03	34,16	129,82	12,01	0,05	9,17E-04
3,76E-03	34,16	128,99	11,92	0,05	9,22E-04
3,82E-03	34,15	128,16	11,85	0,05	9,28E-04
3,88E-03	34,14	127,46	11,80	0,05	9,33E-04
3,93E-03	34,13	126,76	11,76	0,05	9,38E-04
3,99E-03	34,12	126,15	11,72	0,05	9,42E-04
4,04E-03	34,12	125,57	11,69	0,05	9,46E-04
4,10E-03	34,11	125,04	11,65	0,05	9,50E-04
4,16E-03	34,11	124,55	11,62	0,05	9,54E-04
4,21E-03	34,10	124,10	11,58	0,05	9,57E-04
4,27E-03	34,10	123,69	11,52	0,05	9,60E-04
4,32E-03	34,09	123,30	11,46	0,05	9,63E-04
4,38E-03	34,09	122,97	11,38	0,05	9,66E-04
4,44E-03	34,08	122,64	11,29	0,05	9,68E-04
4,49E-03	34,08	122,36	11,16	0,05	9,70E-04
4,55E-03	34,08	122,08	11,04	0,05	9,72E-04
4,61E-03	34,08	121,85	10,87	0,05	9,74E-04
4,66E-03	34,07	121,62	10,69	0,05	9,76E-04
4,72E-03	34,07	121,42	10,47	0,05	9,77E-04
4,77E-03	34,07	121,23	10,23	0,05	9,79E-04
4,83E-03	34,07	121,06	9,95	0,05	9,80E-04
4,89E-03	34,07	120,90	9,63	0,04	9,82E-04
4,94E-03	34,07	120,75	9,29	0,04	9,83E-04
5,00E-03	34,07	120,62	8,90	0,04	9,84E-04
5,05E-03	34,07	120,49	8,49	0,04	9,85E-04
5,11E-03	34,07	120,37	8,00	0,04	9,86E-04
5,17E-03	34,07	120,26	7,51	0,03	9,87E-04
5,22E-03	34,07	120,16	6,93	0,03	9,88E-04
5,28E-03	34,07	120,05	6,35	0,03	9,89E-04
5,34E-03	34,08	119,99	5,78	0,03	9,89E-04
5,39E-03	34,02	120,07	5,38	0,02	9,87E-04
5,45E-03	33,53	120,85	6,24	0,03	9,66E-04
5,50E-03	27,86	128,24	33,17	0,15	7,64E-04
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>80,48</b>	<b>240,52</b>	<b>33,23</b>	<b>0,10</b>	<b>1,04E-03</b>

### 10.3.2 Grafický výstup

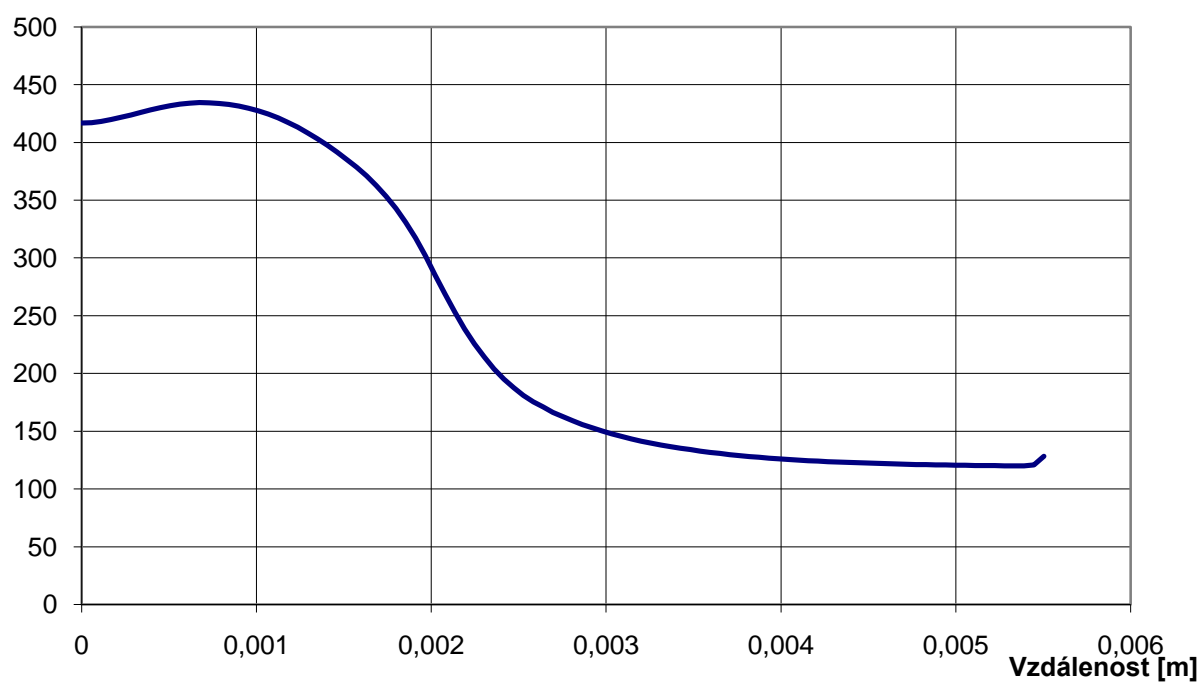
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]



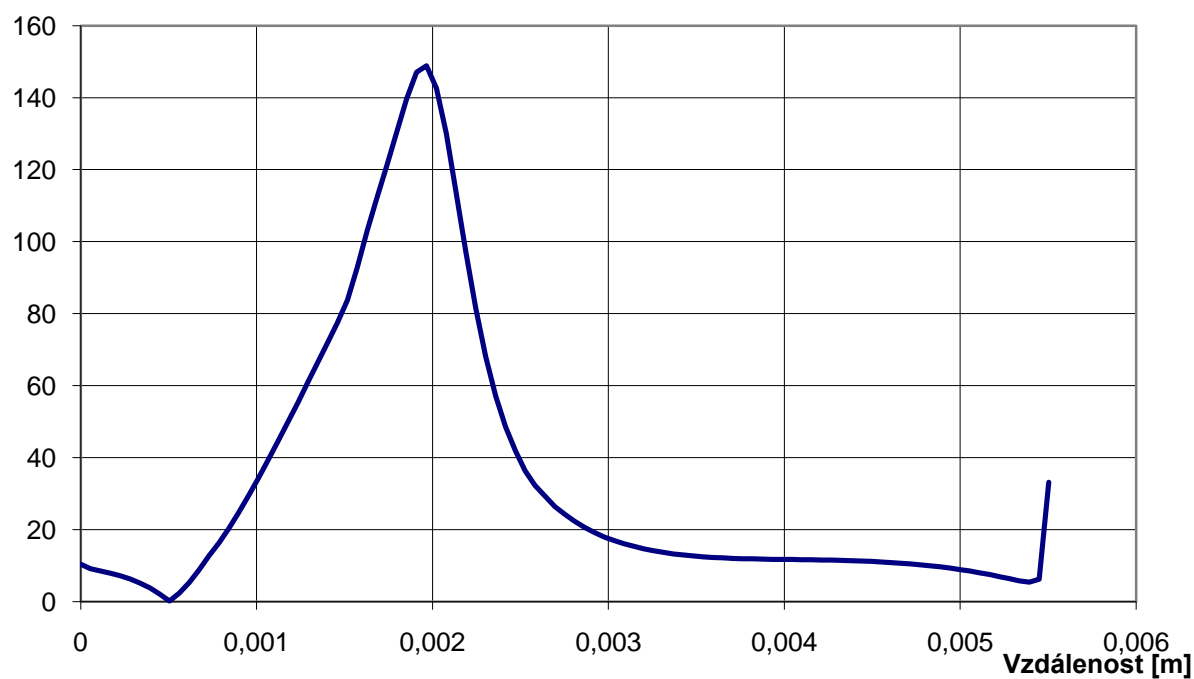
Machovo číslo [-]

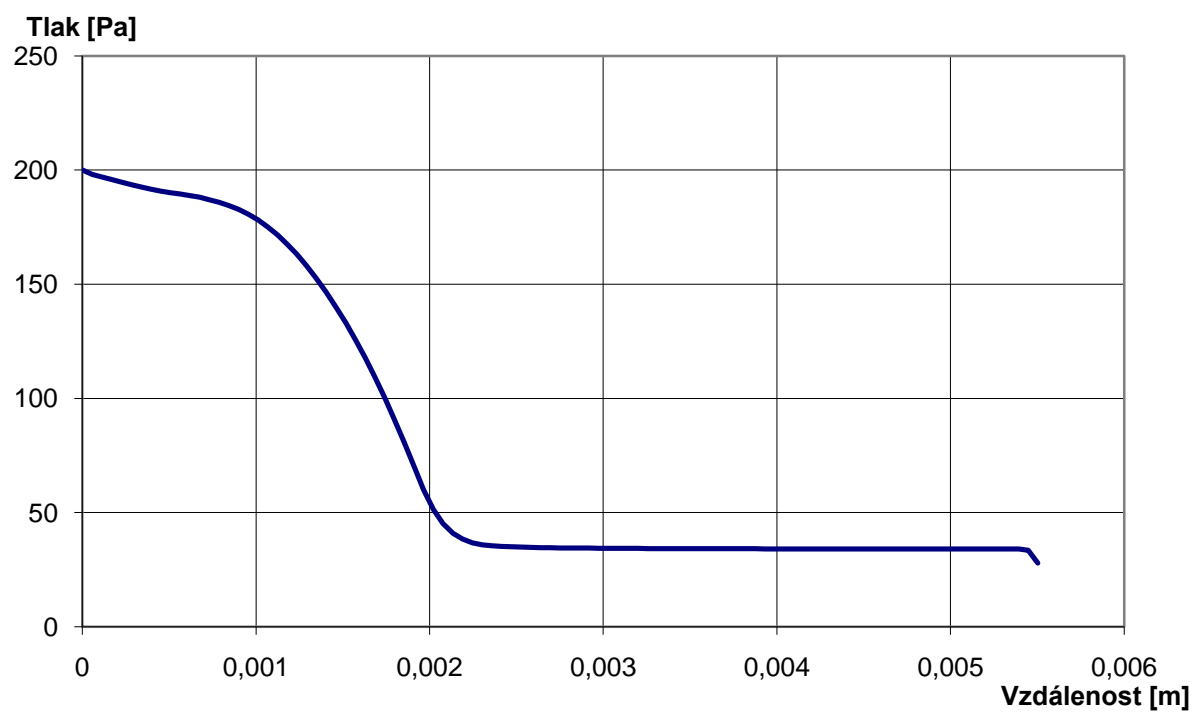


**Teplota [K]**



**Rychlost [m/s]**







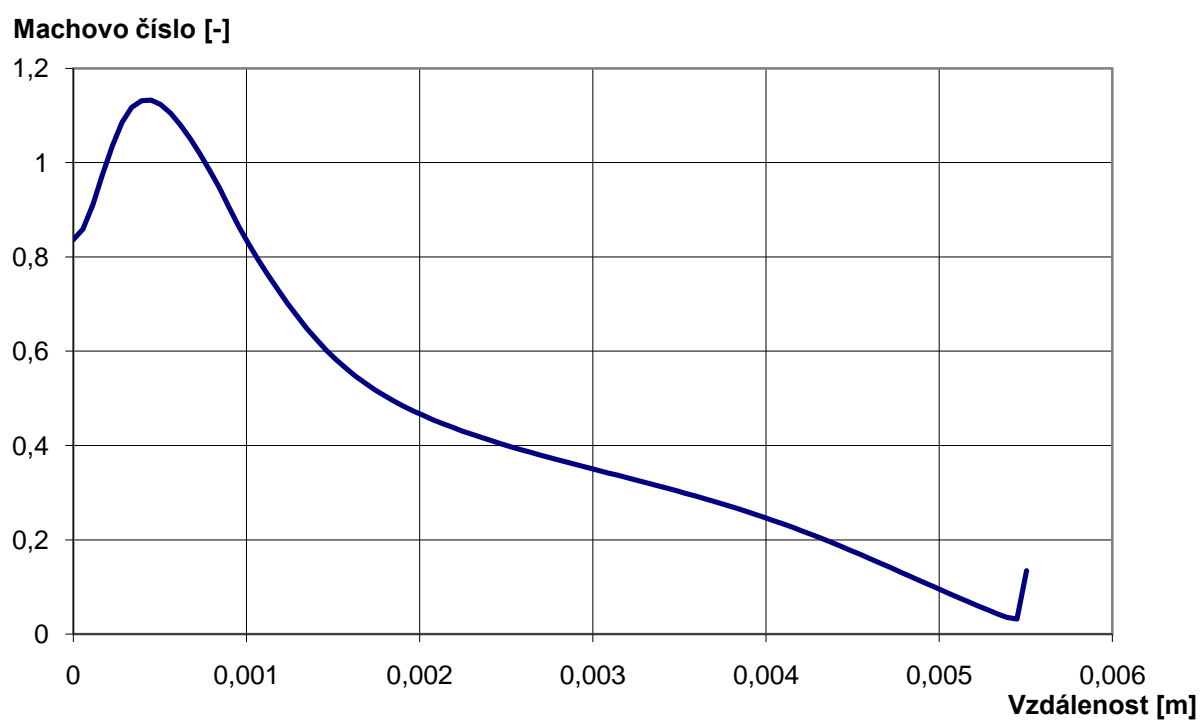
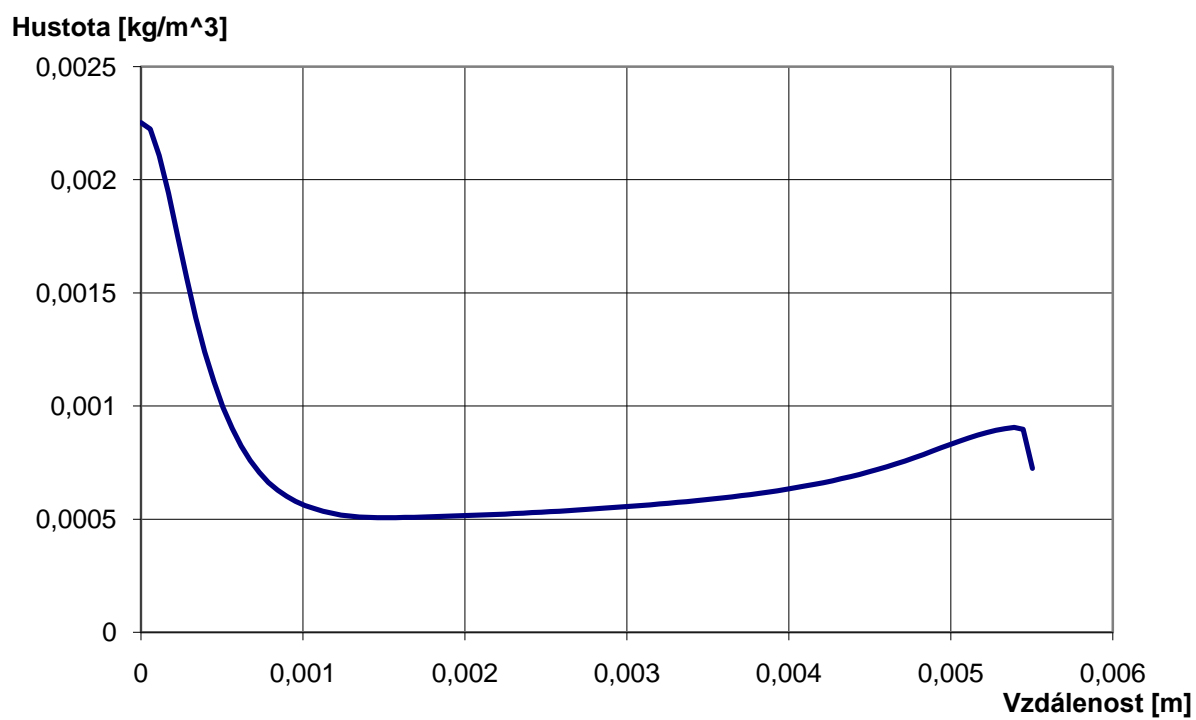
## 10.4 200 Pa Low-cone

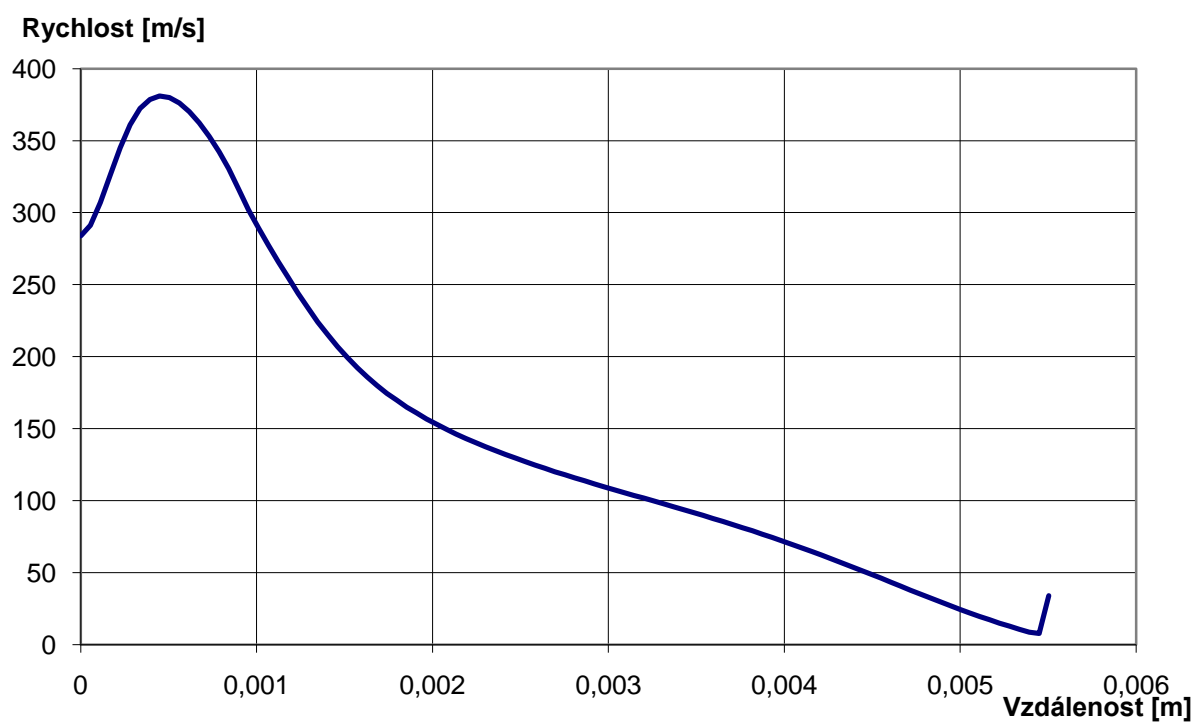
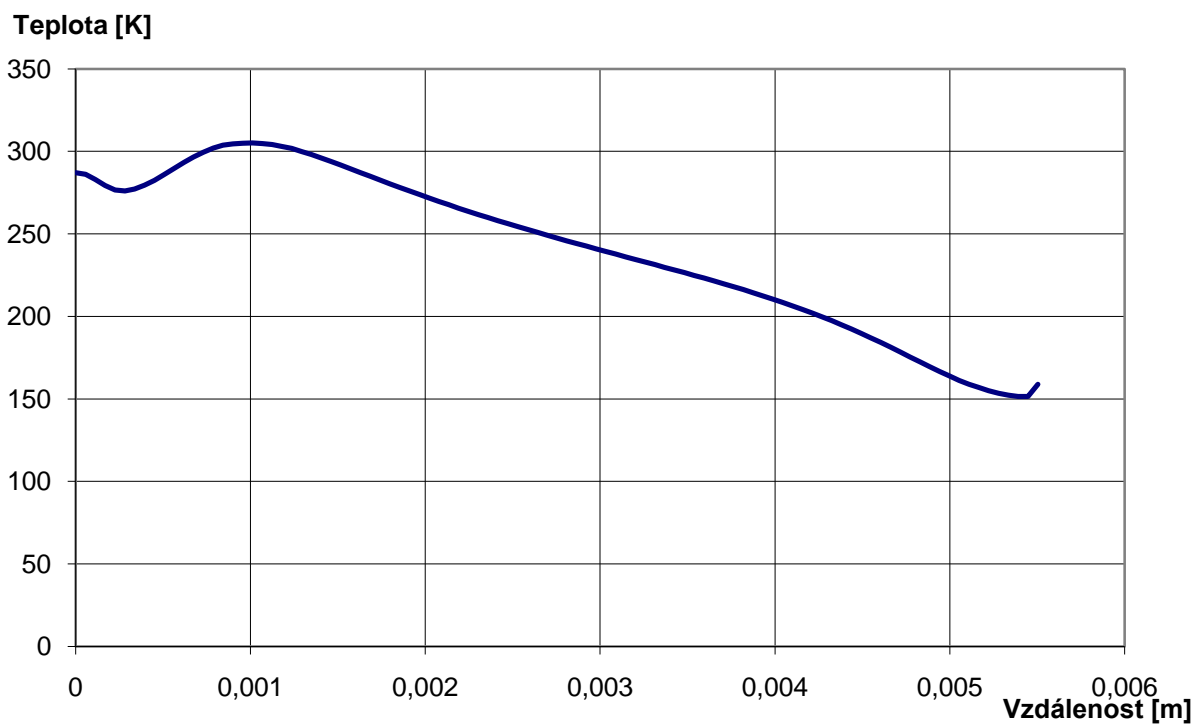
### 10.4.1 Tabulkový výstup

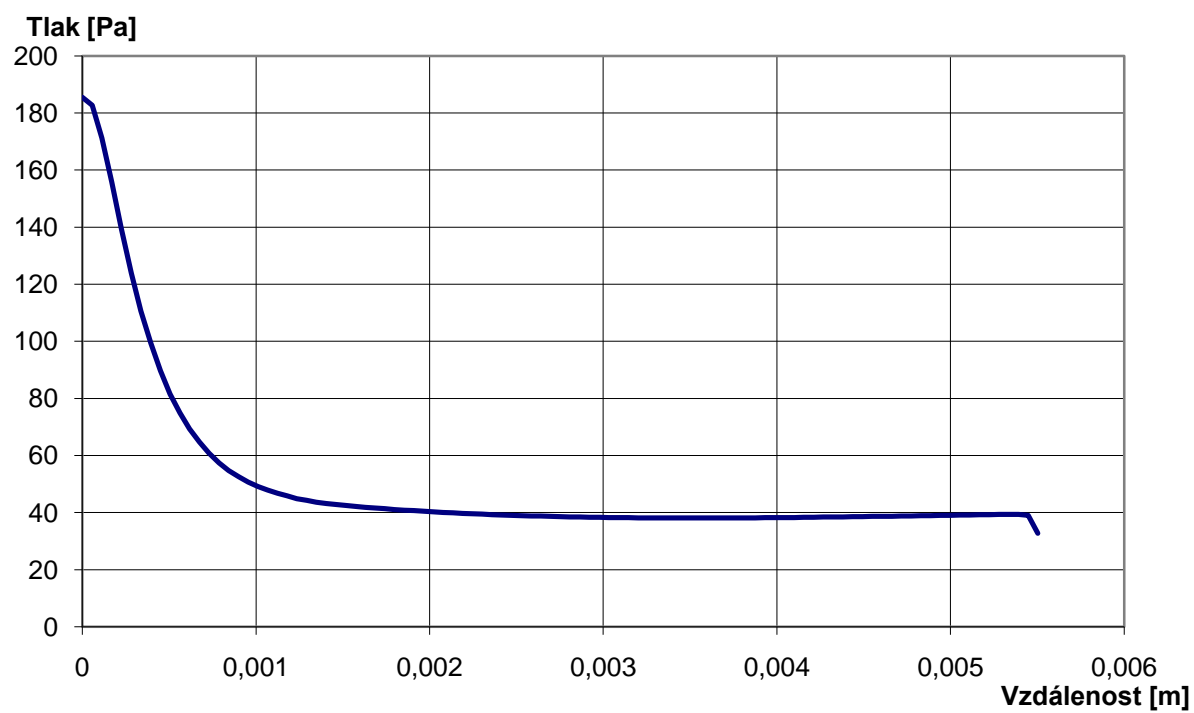
Vzdálenost [m]	Tlak [Pa]	Teplota [K]	Rychlost média [m/s]	Mach [-]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
0,00E+00	185,51	287,00	283,97	0,84	2,25E-03
5,62E-05	182,72	286,18	291,28	0,86	2,22E-03
1,12E-04	171,23	282,99	306,96	0,91	2,11E-03
1,68E-04	155,78	279,29	326,12	0,97	1,94E-03
2,25E-04	139,36	276,61	345,05	1,04	1,75E-03
2,81E-04	123,95	275,95	361,10	1,09	1,56E-03
3,37E-04	110,58	277,17	372,43	1,12	1,39E-03
3,93E-04	99,34	279,48	378,70	1,13	1,24E-03
4,49E-04	89,78	282,43	380,93	1,13	1,11E-03
5,05E-04	81,58	285,91	380,00	1,12	9,94E-04
5,62E-04	74,87	289,62	376,21	1,10	9,01E-04
6,18E-04	69,35	293,27	370,16	1,08	8,24E-04
6,74E-04	64,69	296,64	362,31	1,05	7,60E-04
7,30E-04	60,74	299,59	352,99	1,02	7,06E-04
7,86E-04	57,44	302,01	342,41	0,98	6,63E-04
8,42E-04	54,73	303,77	330,53	0,95	6,28E-04
8,99E-04	52,56	304,60	316,26	0,91	6,01E-04
9,55E-04	50,69	305,01	301,90	0,86	5,79E-04
1,01E-03	49,12	305,15	289,36	0,83	5,61E-04
1,07E-03	47,92	304,74	277,52	0,79	5,48E-04
1,12E-03	46,77	304,17	265,85	0,76	5,35E-04
1,18E-03	45,82	302,96	254,89	0,73	5,27E-04
1,24E-03	44,89	301,74	243,93	0,70	5,18E-04
1,29E-03	44,26	299,93	234,04	0,67	5,14E-04
1,35E-03	43,64	298,13	224,15	0,65	5,10E-04
1,40E-03	43,20	296,05	215,42	0,63	5,08E-04
1,46E-03	42,80	293,91	206,94	0,60	5,07E-04
1,52E-03	42,46	291,69	199,37	0,58	5,07E-04
1,57E-03	42,15	289,42	192,35	0,56	5,07E-04
1,63E-03	41,86	287,15	185,86	0,55	5,08E-04
1,68E-03	41,59	284,88	180,08	0,53	5,09E-04
1,74E-03	41,33	282,63	174,53	0,52	5,09E-04
1,80E-03	41,10	280,40	169,71	0,51	5,11E-04
1,85E-03	40,87	278,17	164,93	0,49	5,12E-04
1,91E-03	40,66	276,00	160,84	0,48	5,13E-04
1,97E-03	40,45	273,84	156,76	0,47	5,15E-04
2,02E-03	40,26	271,74	153,15	0,46	5,16E-04
2,08E-03	40,08	269,66	149,61	0,45	5,18E-04
2,13E-03	39,90	267,63	146,34	0,45	5,19E-04
2,19E-03	39,74	265,64	143,21	0,44	5,21E-04
2,25E-03	39,58	263,68	140,22	0,43	5,23E-04
2,30E-03	39,44	261,77	137,39	0,42	5,25E-04
2,36E-03	39,30	259,88	134,64	0,42	5,27E-04
2,41E-03	39,18	258,04	132,04	0,41	5,29E-04
2,47E-03	39,06	256,21	129,47	0,40	5,31E-04
2,53E-03	38,95	254,43	127,05	0,40	5,33E-04
2,58E-03	38,85	252,66	124,65	0,39	5,36E-04
2,64E-03	38,76	250,94	122,37	0,39	5,38E-04

2,70E-03	38,67	249,22	120,12	0,38	5,40E-04
2,75E-03	38,59	247,54	117,94	0,37	5,43E-04
2,81E-03	38,52	245,87	115,80	0,37	5,46E-04
2,86E-03	38,45	244,22	113,70	0,36	5,48E-04
2,92E-03	38,39	242,58	111,65	0,36	5,51E-04
2,98E-03	38,34	240,96	109,62	0,35	5,54E-04
3,03E-03	38,29	239,35	107,62	0,35	5,57E-04
3,09E-03	38,25	237,74	105,63	0,34	5,60E-04
3,15E-03	38,21	236,14	103,64	0,34	5,64E-04
3,20E-03	38,17	234,55	101,68	0,33	5,67E-04
3,26E-03	38,15	232,95	99,69	0,33	5,70E-04
3,31E-03	38,13	231,36	97,73	0,32	5,74E-04
3,37E-03	38,11	229,75	95,73	0,32	5,78E-04
3,43E-03	38,10	228,14	93,73	0,31	5,82E-04
3,48E-03	38,09	226,51	91,71	0,30	5,86E-04
3,54E-03	38,09	224,87	89,67	0,30	5,90E-04
3,59E-03	38,09	223,20	87,61	0,29	5,94E-04
3,65E-03	38,10	221,50	85,50	0,29	5,99E-04
3,71E-03	38,11	219,79	83,38	0,28	6,04E-04
3,76E-03	38,12	218,01	81,17	0,27	6,09E-04
3,82E-03	38,14	216,23	78,99	0,27	6,14E-04
3,88E-03	38,17	214,36	76,68	0,26	6,20E-04
3,93E-03	38,19	212,48	74,41	0,25	6,26E-04
3,99E-03	38,22	210,51	72,02	0,25	6,33E-04
4,04E-03	38,25	208,52	69,65	0,24	6,39E-04
4,10E-03	38,29	206,43	67,19	0,23	6,46E-04
4,16E-03	38,33	204,30	64,70	0,23	6,54E-04
4,21E-03	38,37	202,09	62,17	0,22	6,62E-04
4,27E-03	38,41	199,79	59,57	0,21	6,70E-04
4,32E-03	38,46	197,44	56,96	0,20	6,79E-04
4,38E-03	38,51	194,95	54,26	0,19	6,88E-04
4,44E-03	38,55	192,45	51,59	0,19	6,98E-04
4,49E-03	38,60	189,76	48,82	0,18	7,09E-04
4,55E-03	38,65	187,06	46,09	0,17	7,20E-04
4,61E-03	38,68	184,21	43,29	0,16	7,32E-04
4,66E-03	38,72	181,33	40,54	0,15	7,44E-04
4,72E-03	38,77	178,38	37,76	0,14	7,58E-04
4,77E-03	38,82	175,41	35,01	0,13	7,71E-04
4,83E-03	38,89	172,42	32,31	0,12	7,86E-04
4,89E-03	38,96	169,46	29,66	0,11	8,01E-04
4,94E-03	39,02	166,58	27,05	0,10	8,16E-04
5,00E-03	39,07	163,84	24,49	0,10	8,31E-04
5,05E-03	39,12	161,29	21,98	0,09	8,45E-04
5,11E-03	39,17	158,93	19,54	0,08	8,59E-04
5,17E-03	39,22	156,84	17,19	0,07	8,71E-04
5,22E-03	39,27	155,02	14,94	0,06	8,82E-04
5,28E-03	39,32	153,50	12,78	0,05	8,92E-04
5,34E-03	39,36	152,30	10,69	0,04	9,00E-04
5,39E-03	39,38	151,51	8,66	0,04	9,05E-04
5,45E-03	39,04	151,54	7,66	0,03	8,97E-04
5,50E-03	32,79	158,94	34,07	0,13	7,24E-04
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>50,90</b>	<b>241,34</b>	<b>150,81</b>	<b>0,46</b>	<b>7,33E-04</b>

### 10.4.2 Grafický výstup







## 11 Příloha 2

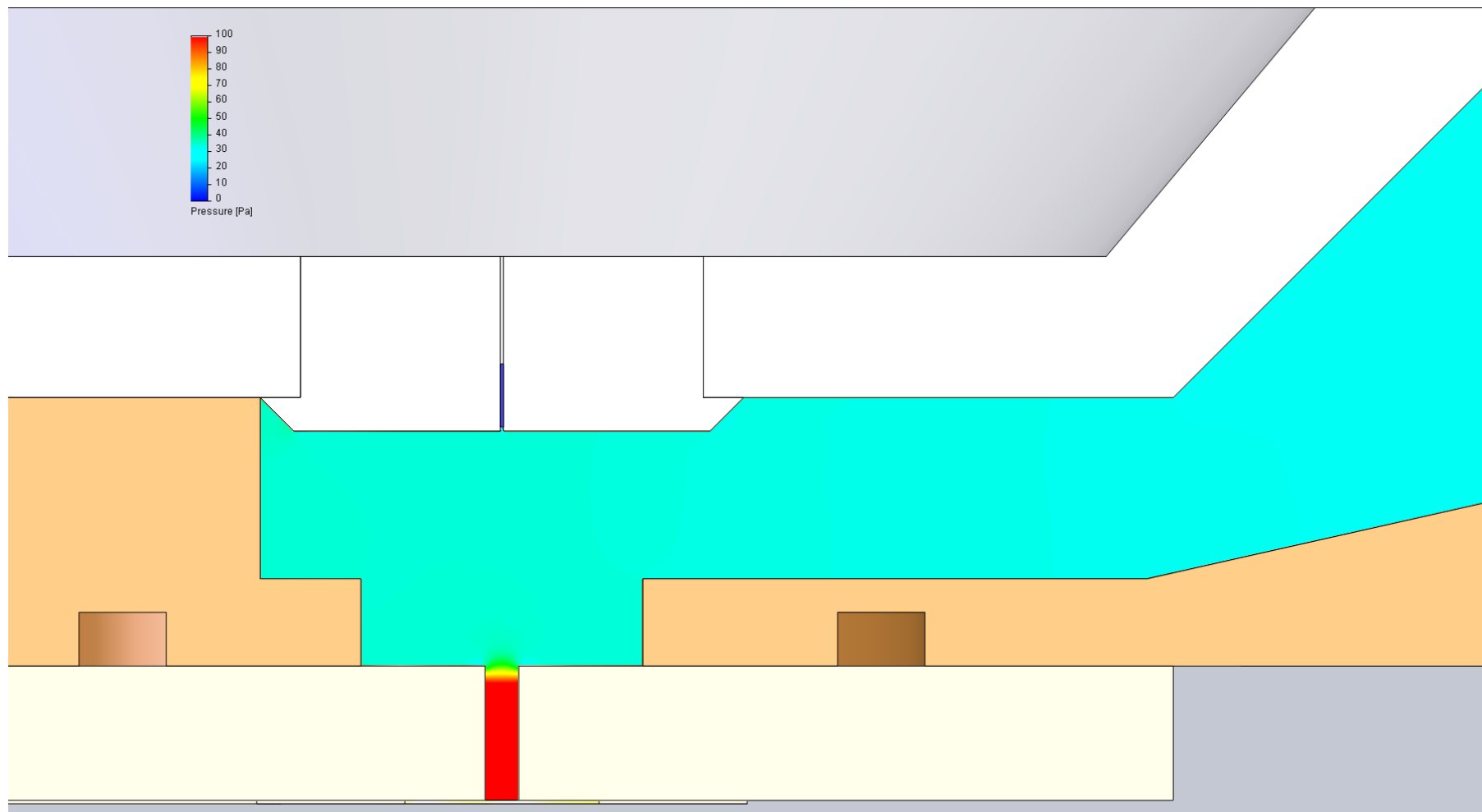
Tato grafická znázornění slouží pro první orientaci.

Jsou zde vidět grafické průběhy tlaku, Machova čísla a vektoru rychlosti proudění pro varianty počátečních podmínek 200 a 1000 Pa.

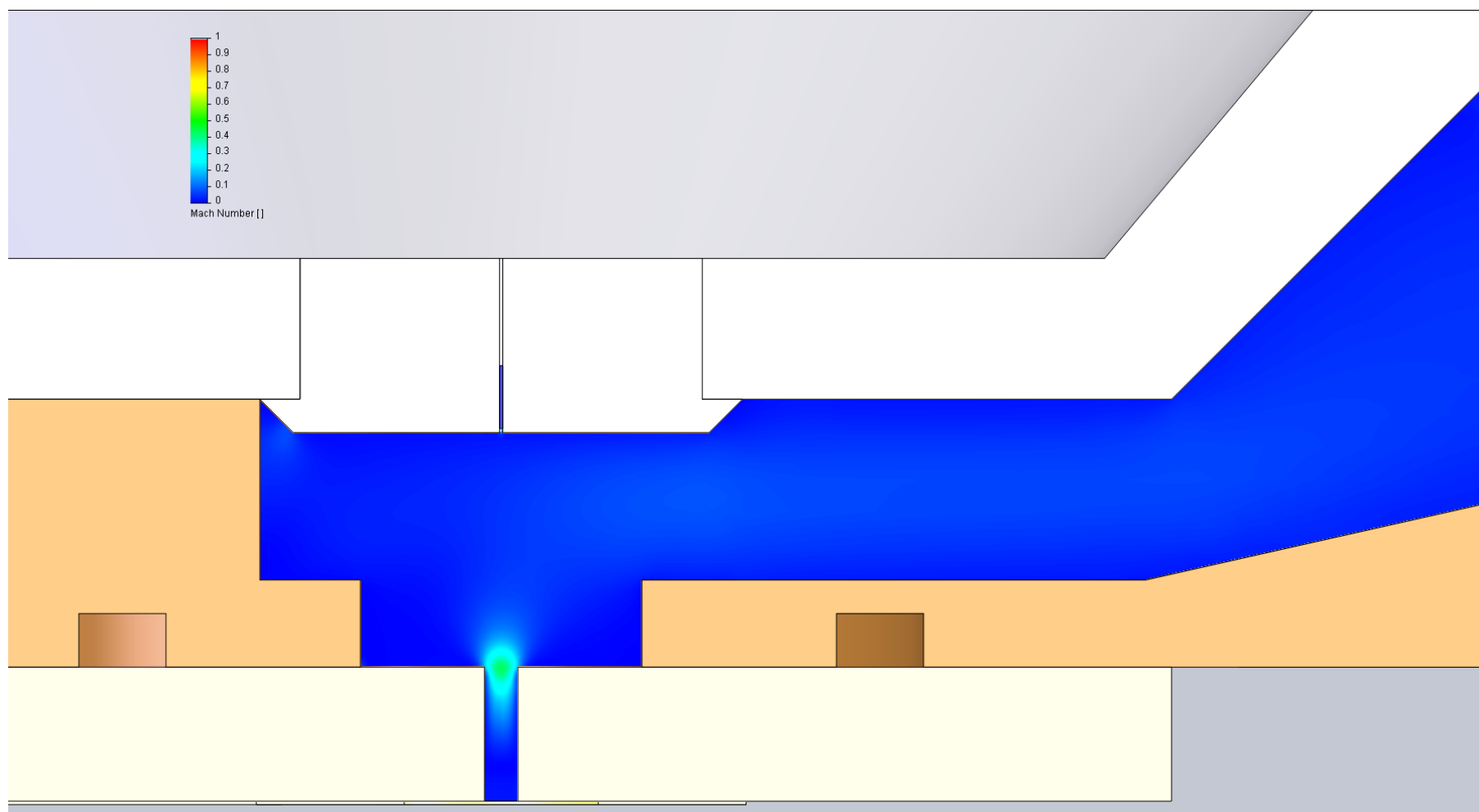
Hrubé nastavení stupnic bylo voleno z důvodu, jak vyplývá ze samotných obrázků, že při velmi hrubém rozložení stupnice, např. při zmíněném širokém rozsahu od 0 až do 1000 Pa by nebyla vidět jemná rozhraní tlaků. Samozřejmě v takovém případě červená barva v obrázku znamená vyšší tlak než 300 Pa, ale nepozná se, zda jde o tlak 300 Pa nebo například 1000 Pa

## 11.1 200 Pa Short

### 11.1.1 Grafický výstup

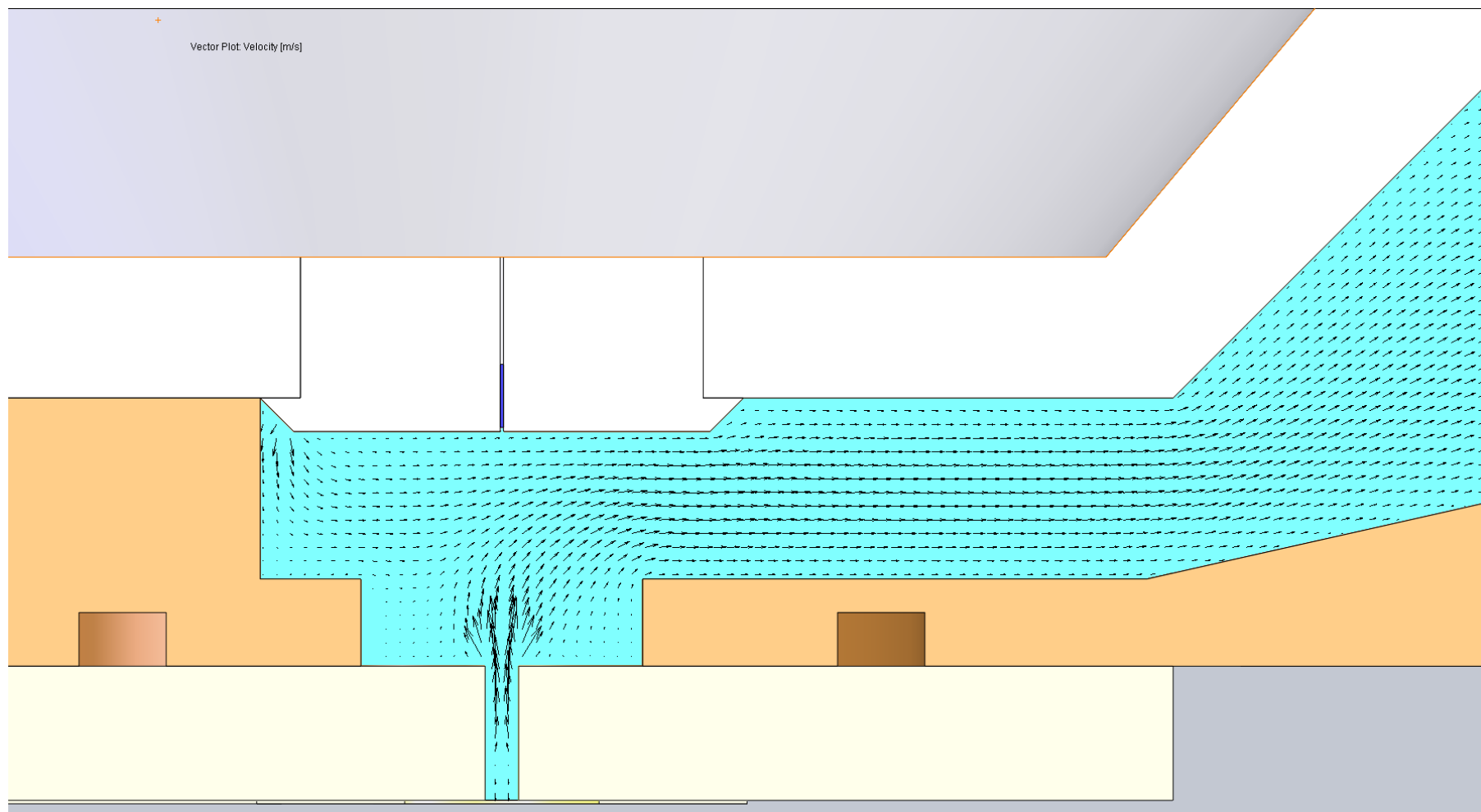


Obr. 11.1: Statický tlak 0 – 100 Pa



Obr. 11.2: Machovo číslo 0 – 1 Mach

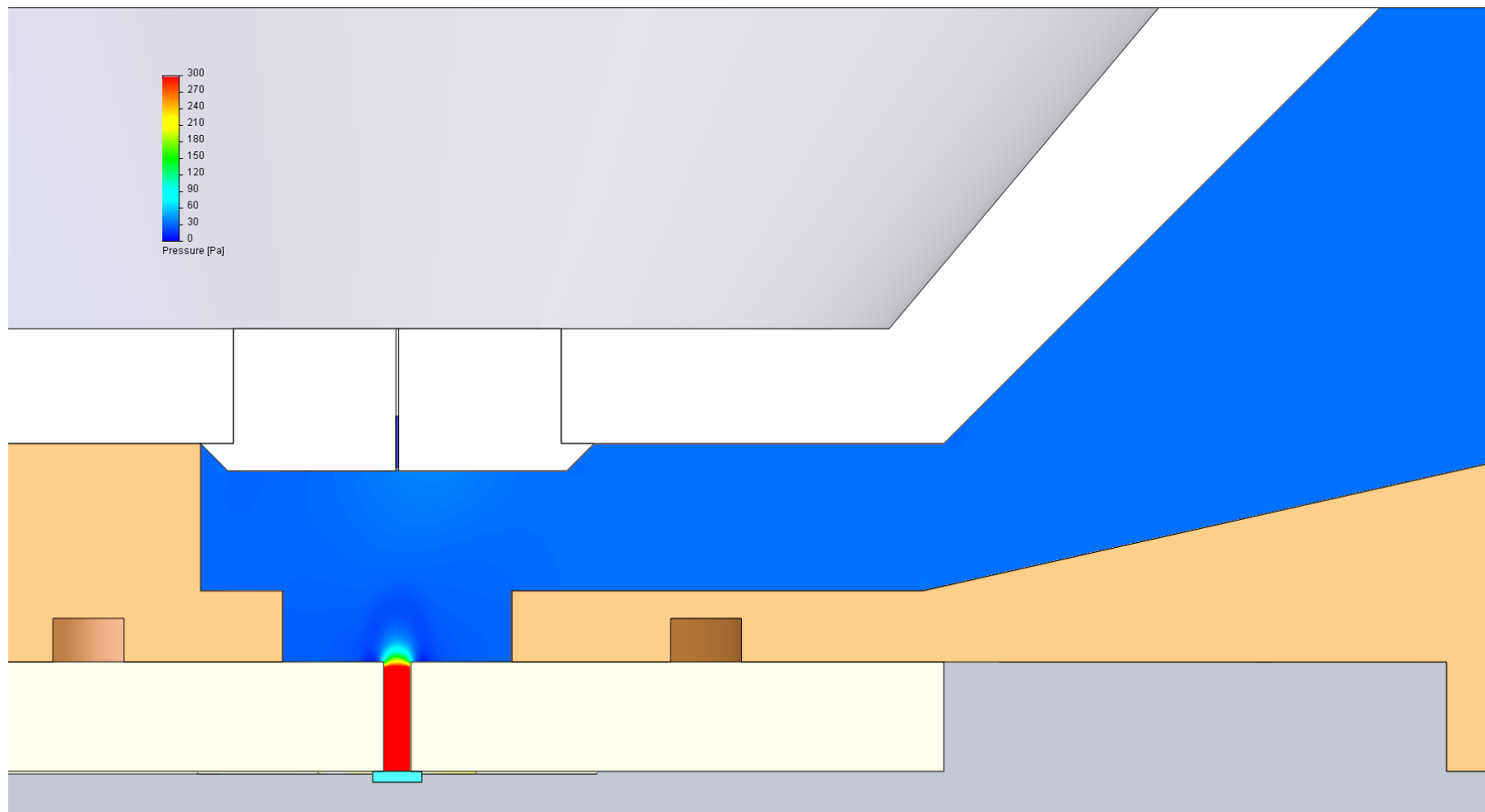




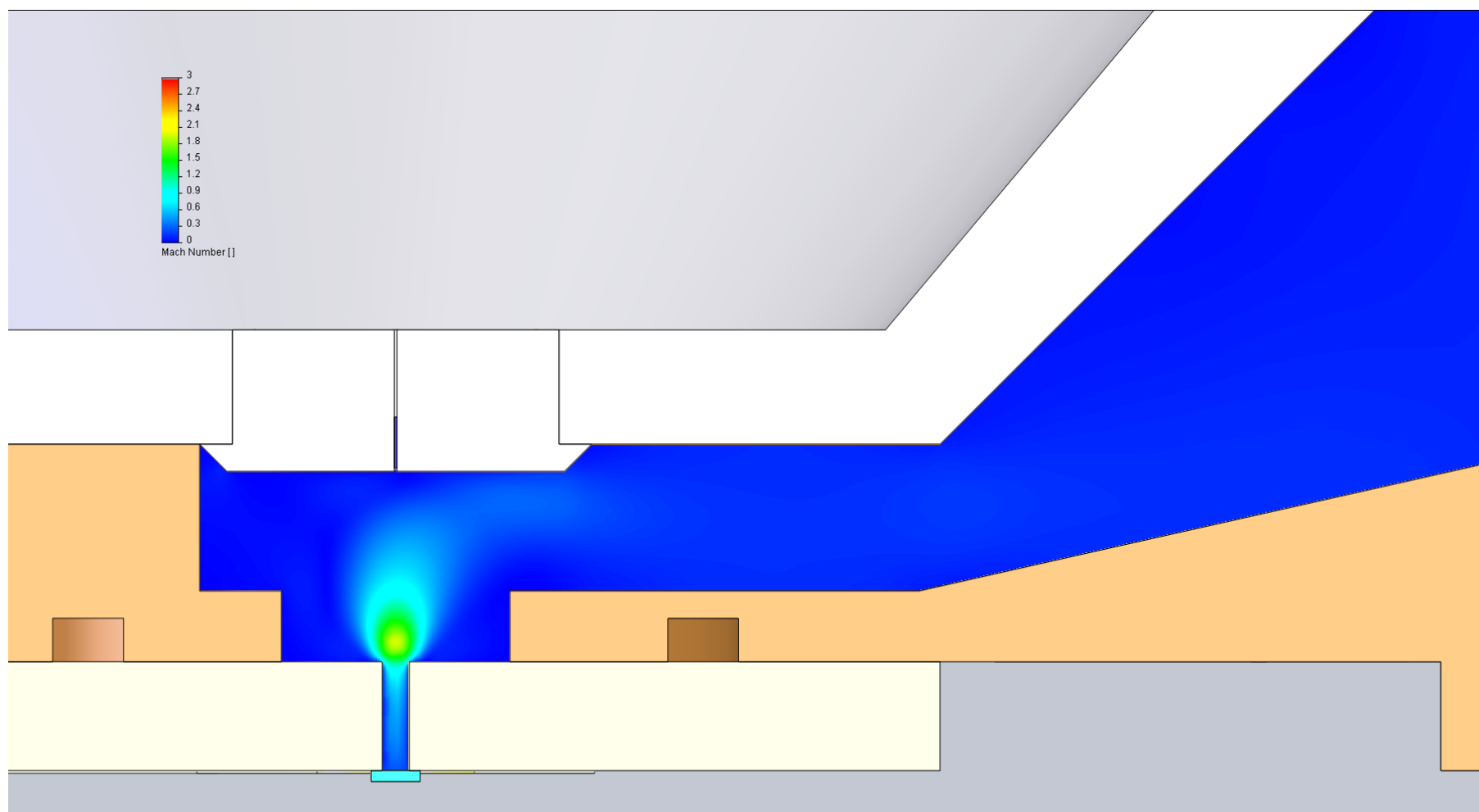
Obr. 11.3: Vektory rychlosti proudění

## 11.2 1000 Pa Short

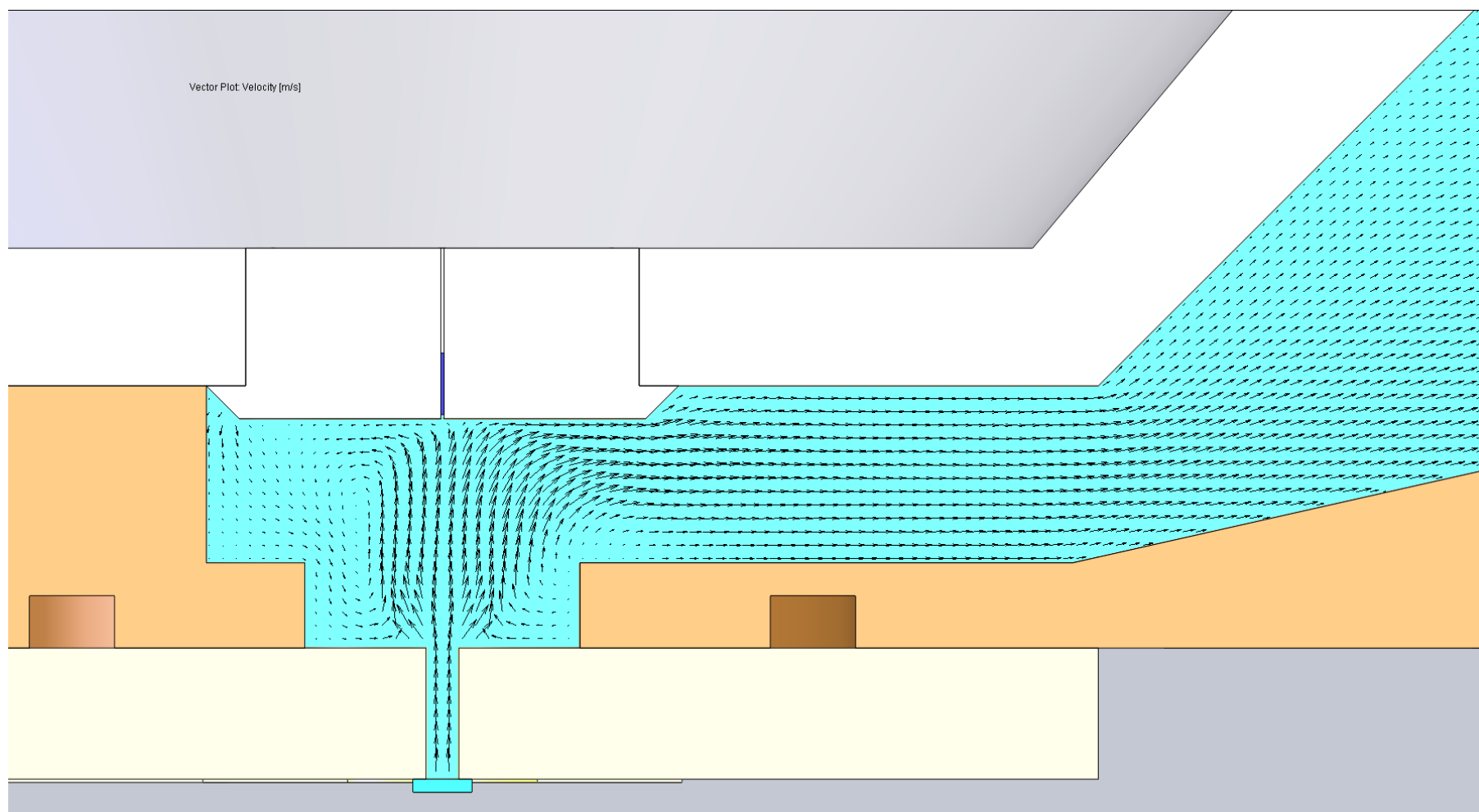
### 11.2.1 Grafický výstup



Obr. 11.4: Statický tlak 0 – 300 Pa



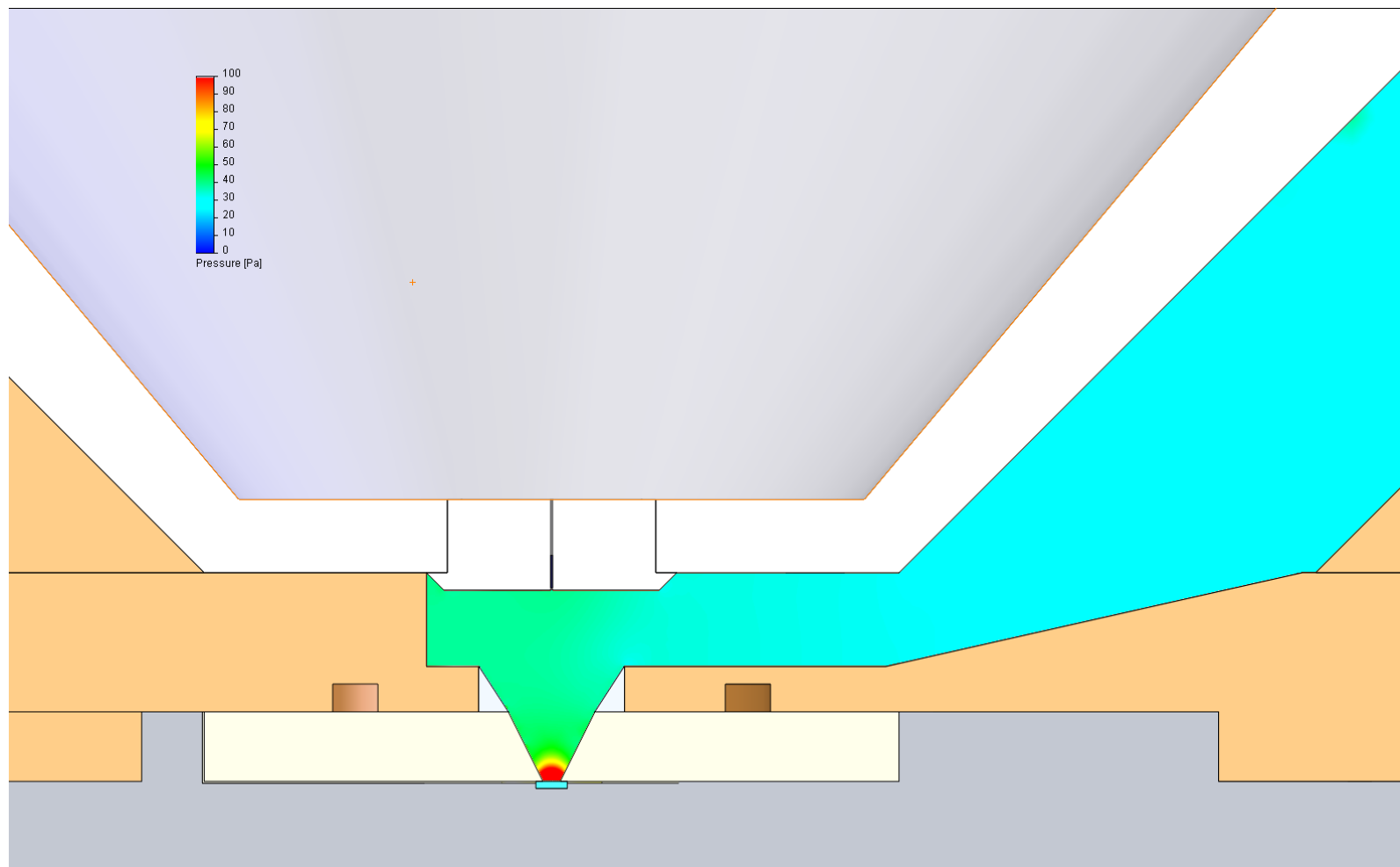
Obr. 11.5: Machovo číslo 0 – 3 Machy



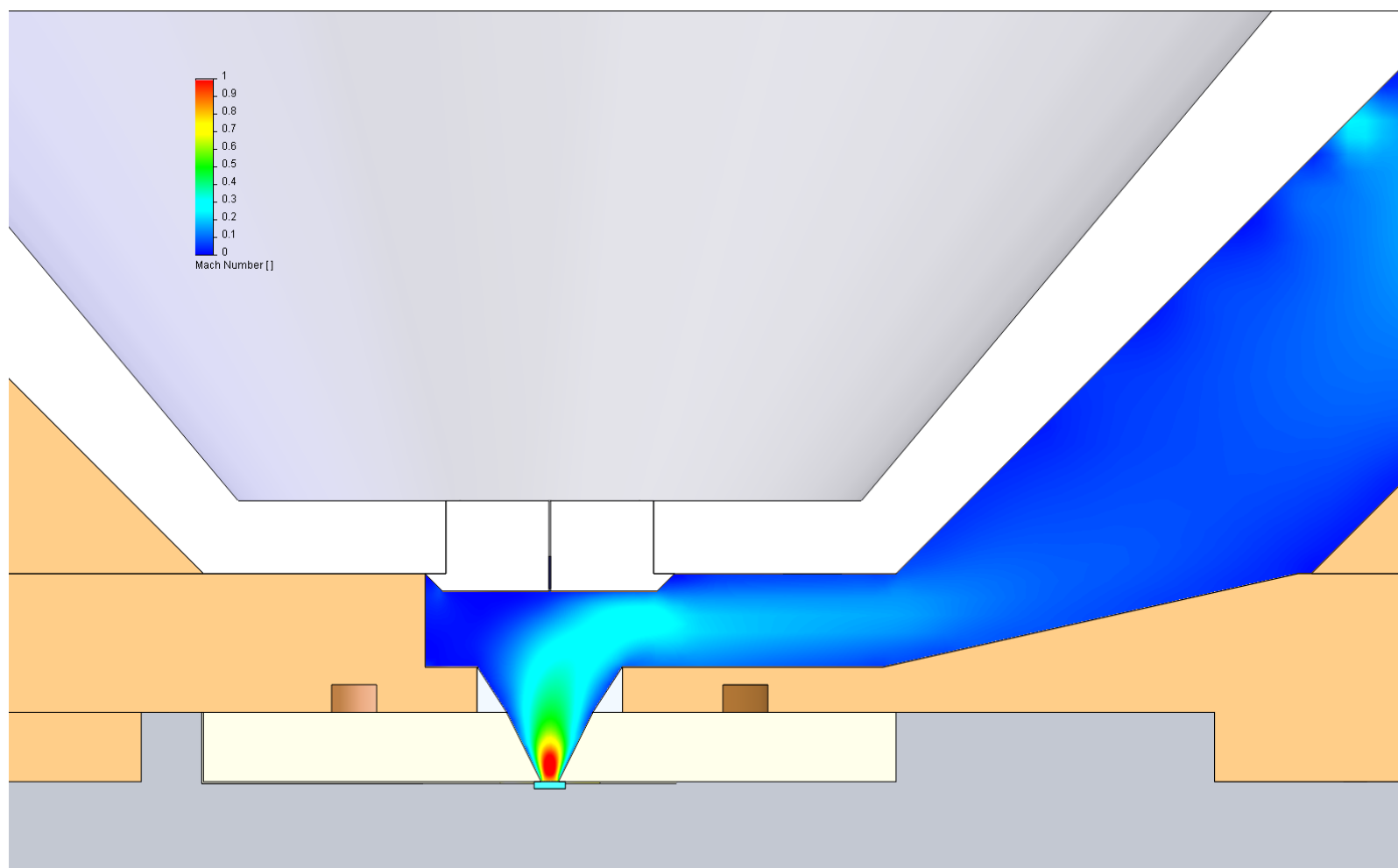
Obr. 11.6: Vektory rychlosti proudění

## 11.3 200 Pa Low-cone

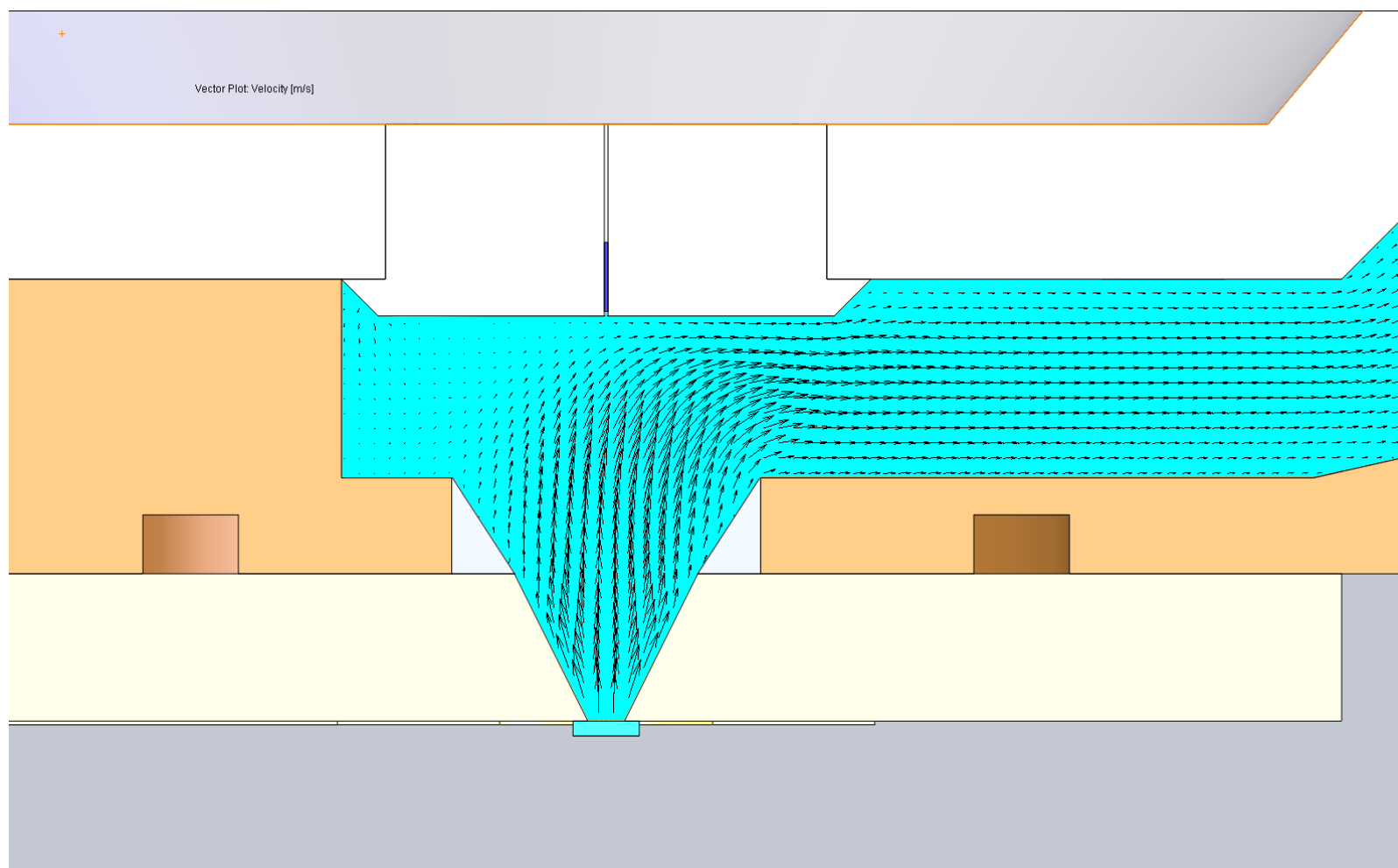
### 11.3.1 Grafický výstup



Obr. 11.7: Statický tlak 0 – 300 Pa



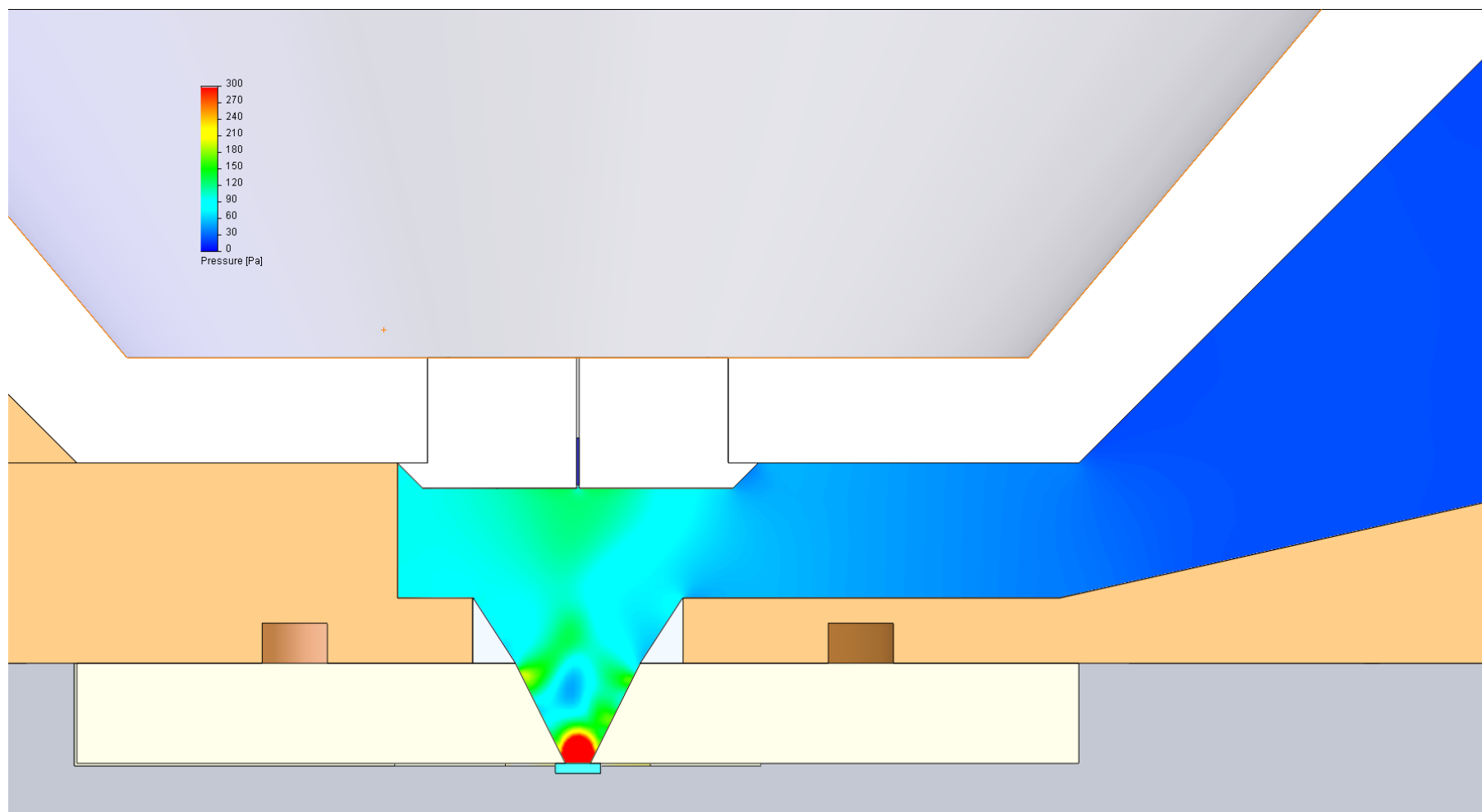
Obr. 11.8: Machovo číslo 0 – 1 Mach



Obr. 11.9: Vektory rychlosti proudění

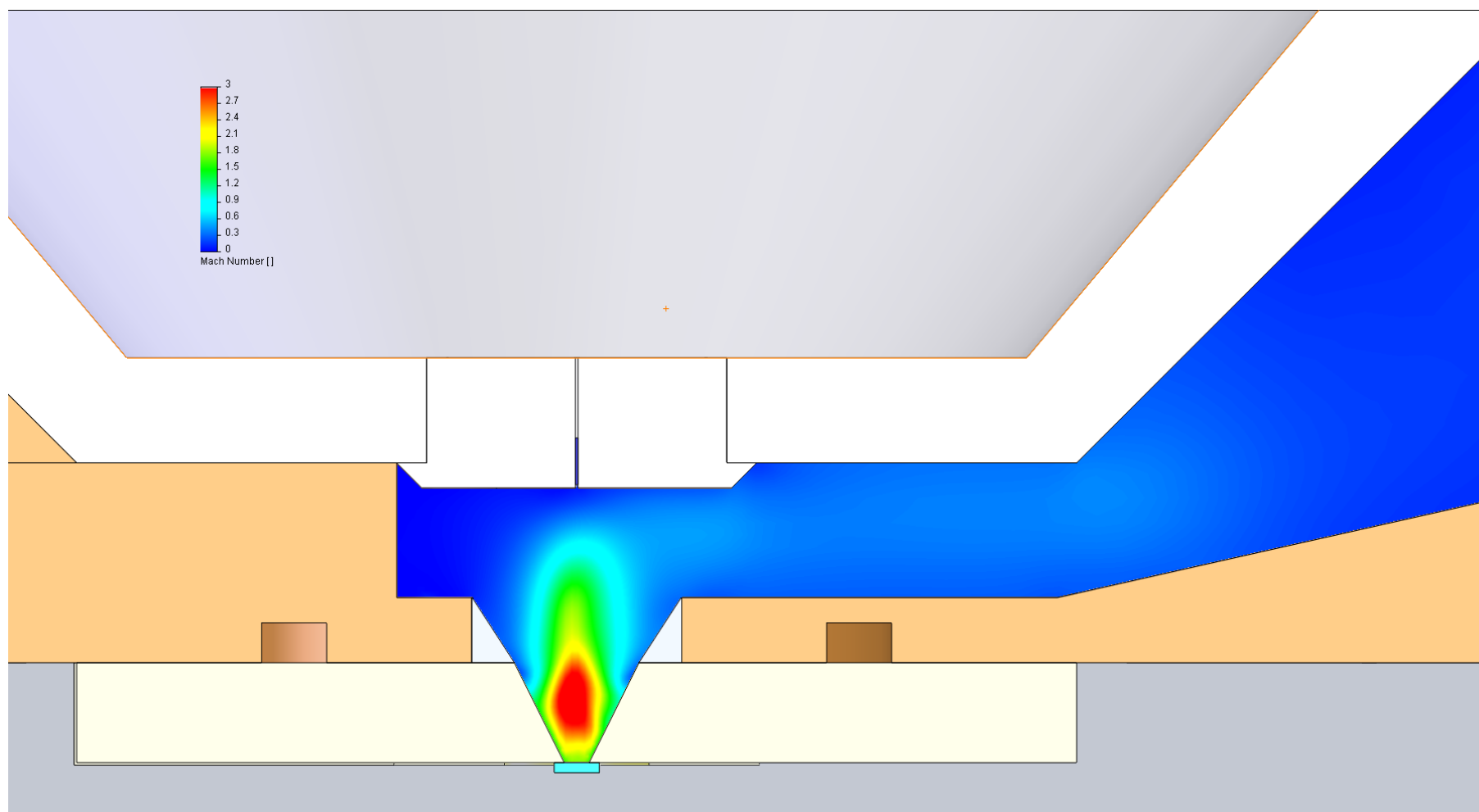
## 11.4 1000 Pa Low-cone

### 11.4.1 Grafický výstup

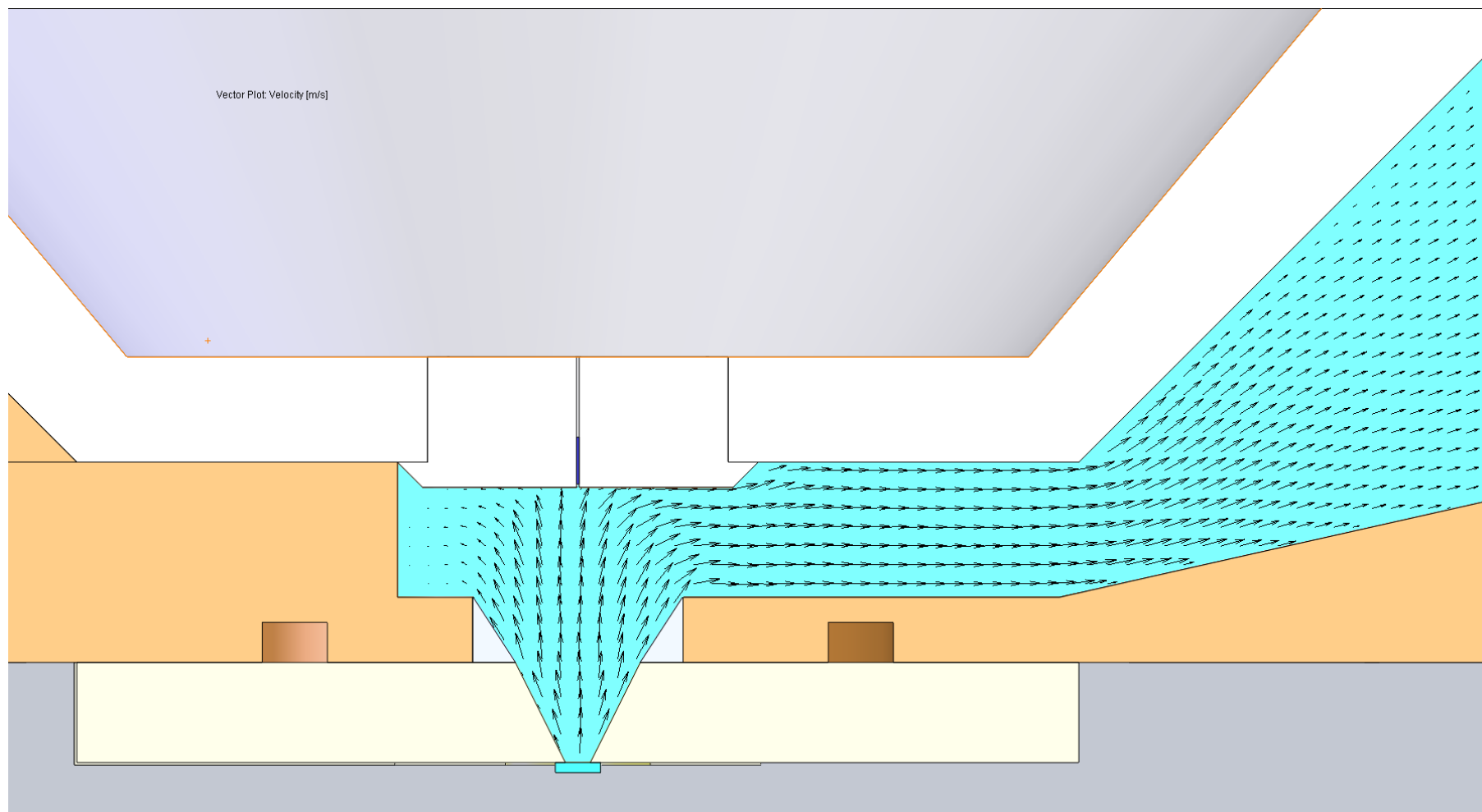


Obr. 11.10: Statický tlak 0 – 300 Pa





Obr. 11.11: Machovo číslo 0 – 3 Machy



Obr. 11.12: Vektory rychlosti proudění